



REPIS -Réflexion Et Propositions d'Indicateurs susceptibles de faire l'objet de Seuil de durabilité

Natacha Gondran, Guillaume Junqua, Miguel Lopez-Ferber, Jacques Méry

► To cite this version:

Natacha Gondran, Guillaume Junqua, Miguel Lopez-Ferber, Jacques Méry. REPIS -Réflexion Et Propositions d'Indicateurs susceptibles de faire l'objet de Seuil de durabilité. [Rapport de recherche] Carnot interétablissements. 2015. emse-01293243

HAL Id: emse-01293243

<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-01293243>

Submitted on 24 Mar 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**REPIS - Réflexion Et Propositions d'Indicateurs susceptibles de faire
l'objet de Seuil de durabilité**

Rapport scientifique

Projet financé par le programme INDECO de Carnot interétablissements



Décembre 2015

Natacha Gondran (EMSE / UMR 5600 EVS)

Guillaume Junqua, Miguel Lopez-Ferber (EMA / LGIE)

Jacques Mery (IRSTEA)

Avec les contributions de Solène David, Benoît Leclerc et Alvaro Gonzalez Roof.

1.1 Enjeux et problématique, état de l'art

Plusieurs articles, publiés dans des revues de renom par des scientifiques reconnus, nous interpellent sur le fait que l'humanité est aujourd'hui confrontée à l'atteinte, par la biosphère, de limites planétaires (Rockström et al., 2009), (Running, 2012), (Jaramillo and Destouni, 2015), (Steffen et al., 2015), (Gerten et al., 2015). Ce projet avait pour objectif de faire une revue des travaux portant sur les notions de seuil d'irréversibilité afin d'identifier les thèmes présentant des « seuils » de soutenabilité écologique ainsi que les indicateurs proposés par la littérature. Il s'agissait plus particulièrement d'envisager les possibilités d'utilisation de cette notion de « seuil d'irréversibilité » au niveau des indicateurs de pressions utilisés à une échelle plus « micro » (pour un territoire, une organisation, une ACV, par exemple). Ce thème des limites planétaires et seuils d'irréversibilité fait l'objet d'une littérature très abondante dans des disciplines variées : écologie, sciences de la Terre, sciences de l'environnement, géographie, philosophie, etc. Il est de surcroît en lien avec des sujets tels que la vulnérabilité, la résilience, l'adaptabilité et le principe de précaution qui font eux-mêmes l'objet de littérature très vaste. Il s'agissait donc d'un travail prospectif non exhaustif.

1.2 Approche scientifique et technique

Nous avons réalisé un premier état de l'art de la question sur trois thèmes particuliers, et par des approches scientifiques différentes. Dans un objectif d'interdisciplinarité, les étudiants de master choisis par les chercheurs impliqués dans le projet INDECO ont été recrutés dans des formations relevant d'autres disciplines que celle dont relève le chercheur tuteur du stage.

- Jacques Méry (IRSTEA Antony), socio-économiste de l'environnement a encadré Solène David (étudiante en géographie à l'ENS de Lyon effectuant le master Systèmes territoriaux, Aide à la décision, Environnement) qui a travaillé sur le cas de la ressource foncière appliquée au puits des flux de matières afin d'identifier les différents critères qui interviennent dans l'établissement des seuils.
- Natacha Gondran (Mines Saint-Etienne), HDR en sciences en génie de l'environnement, a encadré le stage de Benoît Leclerc (étudiant en Master Sciences humaines et sociales, mention Philosophie, spécialité Ethique et Développement Durable) qui a réfléchi sur le lien entre émissions « individuelles » et état de l'environnement planétaire sur le cas du changement climatique.
- Au niveau des Mines d'Alès, ont été impliqués dans le projet des chercheurs spécialistes en sciences en génie de l'environnement (Guillaume Junqua, Alvaro Gonzalez Roof) ainsi qu'un biologiste (Miguel Lopez-Ferber) afin de caractériser les flux de matière et d'énergie, en faisant un zoom sur le cas du phosphore et en utilisant la méthodologie d'ACV territoriale.

1.3 Résultats obtenus

- Le master de Solène David (IRSTEA Antony) a apporté une analyse et une compréhension des mécanismes fonciers visant à contribuer à l'analyse de seuils écologiques et à la

construction d'indicateurs pertinents spatialement et temporellement dans le cas de la disponibilité foncière pour les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDN). Ce cas illustre le fait que les facteurs limitants conduisant à la définition de seuils écologiques ne sont pas seulement physiques. La rareté foncière est en effet déterminée par différents facteurs : artificialisation des sols, critères technico-environnementaux, limitations réglementaires, contraintes juridiques et économiques, conflictualité locale (David, 2015).

- Le master de Benoît Leclerc (Mines Saint-Etienne) a contribué à la réflexion quant à la possibilité et à la pertinence, tant scientifique que philosophique ou politique d'établir des « budgets carbone » par personne. Le seul « seuil » qui semblent aujourd'hui faire consensus au sein de la communauté scientifique et politique internationale, même s'il est contesté par certains scientifiques qui l'estiment déjà trop élevé, porte sur l'état de l'environnement (et non sur les pressions). Il est exprimé en degrés : limiter le changement climatique à un réchauffement global de moins de 2 °C¹. A partir de ce seuil, certains auteurs tels que l'UNEP (2010), Hoekstra et al (2014) ou encore Meinshausen et al (2009) proposent des budgets de carbone à ne pas dépasser. De tels « budgets écologiques », établis sur des bases scientifiques d'acceptabilité des milieux (et non basé sur les émissions actuelles tels que l'envisagent les gouvernements actuels) pourraient être mis en corrélation avec l'empreinte carbone et se décliner à de nombreuses échelles (temporelles comme spatiale). Cependant, la détermination de tels « budgets écologiques » par an et par personne est soumise à de fortes incertitudes scientifiques.
- L'utilisation de l'ACV territoriale pour quantifier les flux d'un territoire, permet à la fois d'estimer les flux direct entrants et sortant du territoire, mais aussi les flux indirects générés par les activités du territoire mais se déroulant sur d'autres territoires. Les résultats montrent que pour estimer la contribution d'un territoire à un processus d'irréversibilité global, il est nécessaire de discriminer les flux directs et indirects. Le total de ces flux peut être comparé aux limites planétaires de Rockstrom et aux stocks mondiaux de phosphore par une normalisation par rapport au nombre d'habitant en 2010. Toutefois, des problèmes de double comptage pourraient survenir avec cette approche. Les flux in site pourraient quant à eux être comparés à des indicateurs locaux d'autosuffisance du territoire ou de qualité des eaux et des rejets, ayant des conséquences locales ou tout au moins localisés (si certains flux sont exportés) Il doit ainsi être possible, en élargissant cette analyse à un plus grand nombre de flux élémentaires, de déterminer, pour un écosystème donné, les bornes qui lui sont propres. Si l'évaluation des bornes planétaires se heurte à la diversité des écosystèmes, chacun avec des limites qui lui sont propres, la détermination de ces « thresholds » pour un ou un nombre bien limité d'écosystèmes rentre dans le domaine du réalisable, permettant de proposer des bornes spécifiques. Il sera donc possible de déterminer quel est la responsabilité d'un territoire (ou de plusieurs territoires) dans le dépassement d'une certaine borne. Egalement, mais en procédant de façon inversé, il sera possible d'établir quelles sont les contributions maximales admissibles de chaque contributeur pour un écosystème donné.

1.4 Exploitation des résultats

Ce projet a donné lieu à la rédaction de deux stages de master recherche. Il a également été utilisé et mentionné dans les mémoires d'habilitation à diriger les recherches de Guillaume Junqua et Natacha Gondran.

¹ Accord de Copenhague de 2009 (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/L-Accord-de-Copenhague,21485.html>)

1.5 Discussion

Si seuils écologiques et budgets d'émissions cumulés peuvent être estimés par démarche scientifique, bornes planétaires et budget d'émission par personne et par an implique un processus collectif (politique ?). Suite à ce projet, plusieurs perspectives de recherche se présentent dans ce domaine : plusieurs perspectives de recherche en termes d'applications locales travaux sur les bornes planétaires et capacité de charge:

- La Technical University of Denmark est en train de développer une méthode de normalisation basée sur les capacités de charge des écosystèmes afin de **hiérarchisation la gravité des impacts** (Bjorn, 2015).

- **L'estimation des flux liés à la consommation de ménages** (empreinte d'un citoyen moyen) en lien avec les seuils de Rockström présente aujourd'hui des limites méthodologiques et verrons méthodologiques qu'il nous semblerait intéressant de pouvoir améliorer.

2 Sommaire

1.1 Enjeux et problématique, état de l'art.....	2
1.2 Approche scientifique et technique.....	2
1.3 Résultats obtenus.....	2
1.4 Exploitation des résultats	3
1.5 Discussion.....	4
2 Sommaire.....	5
1. Introduction.....	6
3 Enjeux et problématique, état de l'art.....	6
3.1 Les notions de limites, seuils et bornes écologiques	9
3.2 Résilience	18
4 Approche scientifique et technique et résultats obtenus	20
4.1 Réflexions pour l'établissement de « budgets carbone » (stage de Benoit Leclerc, Mines Saint-Etienne).....	20
4.1.1 Récapitulatif et comparaisons des différents « budgets carbone » proposés.	20
4.1.2 Limites de ces calculs	23
4.1.3 Influence de l'échéance de temps prise en compte	28
4.1.4 Les émissions directes et indirectes.....	29
4.1.5 Des seuils lointains	30
4.1.6 Des conséquences ignorées	31
4.1.7 Des chiffres au pouvoir décisionnaire	32
4.1.8 Application d'échelle	32
4.2 Rareté foncière et stockage des déchets : un seuil de soutenabilité pour le traitement des déchets en Ile de France ?	32
4.3 Caractérisation des flux de matière et d'énergie - Utilisation de la méthodologie d'ACV territoriale	34
5 Exploitation des résultats	37
6 Discussion	40
7 Références bibliographiques.....	43

1. Introduction

Depuis la révolution industrielle, les activités humaines deviennent le principal facteur des changements de l'environnement global et ont atteint un niveau tel que des changements environnementaux brutaux, parfois irréversibles, pourraient amener la Terre à un état moins propice au développement humain. Plusieurs articles, publiés dans des revues de renom par des scientifiques reconnus, nous interpellent sur le fait que l'humanité est aujourd'hui confrontée à l'atteinte, par la biosphère, de limites planétaires (Rockström et al., 2009), (Running, 2012), (Jaramillo and Destouni, 2015), (Steffen et al., 2015), (Gerten et al., 2015). Ces articles, mis en avant par la revue Science, nous alertent sur le risque que l'écosystème planétaire atteigne un niveau de dégradation qui dépasse des « seuils d'irréversibilité ». J. Rockström et ses collègues ont ainsi proposé de définir un « *espace de fonctionnement sécurisé* » à l'intérieur duquel l'Humanité respecterait le système terre et ses sous-systèmes biophysiques (Rockström et al. 2009). Si l'on dépasse ces seuils, les ressources biologiques, dont nous dépendons, risquent de subir des transformations rapides et imprévisibles à l'horizon de quelques générations (Barnosky et al., 2012). Plus de 40 % des terres auparavant riches en biodiversité sont aujourd'hui consacrées à un faible nombre d'espèces, que ce soit des cultures, des animaux domestiques ou des hommes (Barnosky et al. 2011). Partout dans le monde, du fait des changements climatiques et des transformations d'habitats naturels, de nombreux signaux d'alerte sont observables en termes de variétés, phénologie et abondances d'espèces (Barnosky et al. 2011).

Ce projet avait pour objectif, en s'inspirant de la littérature portant sur l'empreinte écologique, de faire une revue des travaux portant sur les notions de seuil d'irréversibilité afin d'identifier les thèmes présentant des « seuils » de soutenabilité écologique ainsi que les indicateurs proposés par la littérature. Il s'agissait plus particulièrement d'envisager les possibilités d'utilisation de cette notion de « seuil d'irréversibilité » au niveau des indicateurs de pressions utilisés à une échelle plus « micro » (pour un territoire, une organisation, une ACV, par exemple).

3 Enjeux et problématique, état de l'art

L'article de référence ayant suscité l'idée du projet est (Rockström et al., 2009). Pour Johan Rockström et ses collègues (2009), certains sous-systèmes biophysiques présentent des limites qui ne devraient pas être dépassées, sous peine de voir l'écosystème planétaire dériver vers des conditions potentiellement désastreuses pour la vie humaine. Ces auteurs pensent qu'il devient urgent de préserver un espace de fonctionnement sécurisé (« *safe operating space* ») pour l'humanité, afin d'assurer le maintien de l'équilibre des processus et sous-systèmes biophysiques planétaires. Pour le grand public, l'idée d'un bouleversement écologique planétaire se limite bien souvent à la question du changement climatique, dont les médias se font régulièrement l'écho. Pourtant, bien au-delà du seul

climat, plusieurs autres équilibres écologiques majeurs présentent des seuils qui, pour certains d'entre eux, seraient sur le point d'être dépassés. De nombreux sous-systèmes biophysiques réagissent en effet de façon non-linéaire, souvent abrupte, et sont particulièrement sensibles lorsque l'on dépasse de niveaux seuils pour certains paramètres. Les conséquences risquent alors d'être irréversibles et pourraient, dans certains cas, conduire à des changements environnementaux démesurés. Même si tous les processus ou sous-systèmes naturels ne font pas l'objet de seuils clairement établis, les actions humaines qui dégradent leur résilience augmentent le risque que les seuils soient dépassés dans d'autres domaines. Par exemple, la dégradation de la qualité des sols et des masses d'eau peut rendre les systèmes plus sensibles aux changements climatiques. Johan Rockström et ses collègues ont ainsi défini neuf processus pour lesquels des limites planétaires à ne pas dépasser peuvent être définies : le changement climatique, le taux de perte en biodiversité (terrestre et marine), l'interférence entre les cycles de l'azote et du phosphore, l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'acidification des océans, l'utilisation planétaire d'eau douce, le changement d'affectation des sols, la charge en aérosols atmosphériques et la pollution chimique. Ces neuf limites sont représentées sur le graphique ci-dessous et précisées dans le Tableau 1.

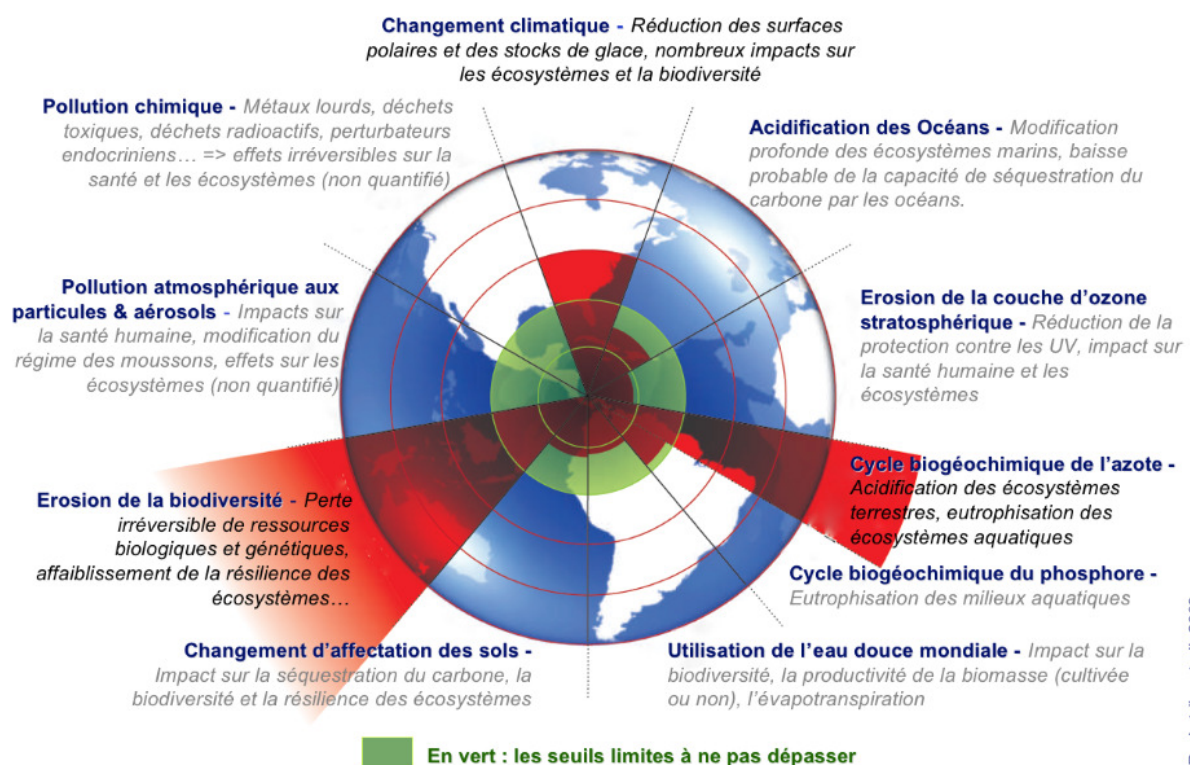


Figure 1. Au-delà des limites (Rockström et al., 2009)

La zone verte représente l'espace de fonctionnement sécurisé pour les neufs thèmes définis.

Avec l'autorisation de Macmillan Publishers Ltd: *Nature*, "Approaching a State Shift in Earth/'s Biosphere", copyright 2012.

Processus du système terre	Paramètres	Limites proposées	Etat actuel (2009)	Valeur pré-industrielle
Changement climatique	Concentration en CO ₂ (ppm en volume)	350	387	280
	Modification du forçage radiatif (en W/m ²)	1	1,5	0
Erosion de la biodiversité	Taux d'extinction (nombre d'espèces disparues par million d'espèces par an)	10	> 100	0,1 - 1
Cycle de l'azote (lié au cycle du phosphore)	Montant de N ₂ enlevé de l'atmosphère pour une utilisation anthropique (millions de tonnes par an)	35	121	0
Cycle du Phosphore (lié au cycle de l'azote)	Quantité de P rejetée dans les océans (millions de tonnes par an)	11	8,5 – 9,5	-1
Appauvrissement de la couche d'ozone	Concentration d'ozone (en Dobson)	276	283	290
Acidification des océans	Etat de saturation moyenne globale en aragonite des eaux marines de surface	2,75	2,90	3,44
Utilisation planétaire d'eau douce	Consommation d'eau douce par les humains (km ³ par an)	4000	2600	425
Changement d'affectation des sols	Pourcentage de surface de la terre convertie en sols cultivables	15	11,7	faible
Pollution aux aérosols atmosphériques	Concentration en particules totales	A définir		
Pollution chimique	Quantités émises ou concentrations moyennes mondiales en polluants organiques persistants, plastiques, perturbateurs endocriniens, métaux lourds et déchets nucléaires ou leurs effets sur les écosystèmes et le fonctionnement du système Terre	A définir		

Tableau 1. Les limites de la planète (traduit de (Rockström et al., 2009))

L'analyse de Rockström et ses collègues (2009) montre que les limites de la planète sont déjà dépassées pour trois grands domaines : le changement climatique, le taux de disparition de la biodiversité et les interactions avec le cycle de l'azote. On s'approche également dangereusement des limites en ce qui concerne l'utilisation d'eau douce, les interactions avec le cycle du phosphore, le changement d'affectation des terres et l'acidification des océans. Ces dépassements ne pourront pas se prolonger indéfiniment sans éroder significativement la résilience des principaux composants qui garantissent le fonctionnement actuel du système terre. Ces différentes limites sont de surcroît intimement liées les unes aux autres. Par exemple, transgresser les limites d'acidification des océans ainsi que celles des cycles de l'azote et du phosphore limitera, à terme, la capacité des océans à absorber le carbone atmosphérique. Le changement d'affectation des terres contribue au changement climatique, mais il réduit également la résilience des systèmes locaux face aux changements globaux. Et ainsi de suite.

Deux contraintes fortes pèsent sur l'estimation de ces limites : l'incertitude et l'irréversibilité. Si de nombreuses incertitudes planent sur la valeur exacte des seuils écologiques, les scientifiques nous alertent sur le fait qu'une fois que les écosystèmes auront dépassé ces seuils, les phénomènes en présence seront irréversibles. L'affectation d'un nombre inconnu et potentiellement élevé de générations futures induit alors un pari pascalien non plus individuel mais collectif, et conduit naturellement au principe de responsabilité et de précaution, à défaut de possibilité d'une analyse probabilisée de risques.

3.1 Les notions de limites, seuils et bornes écologiques

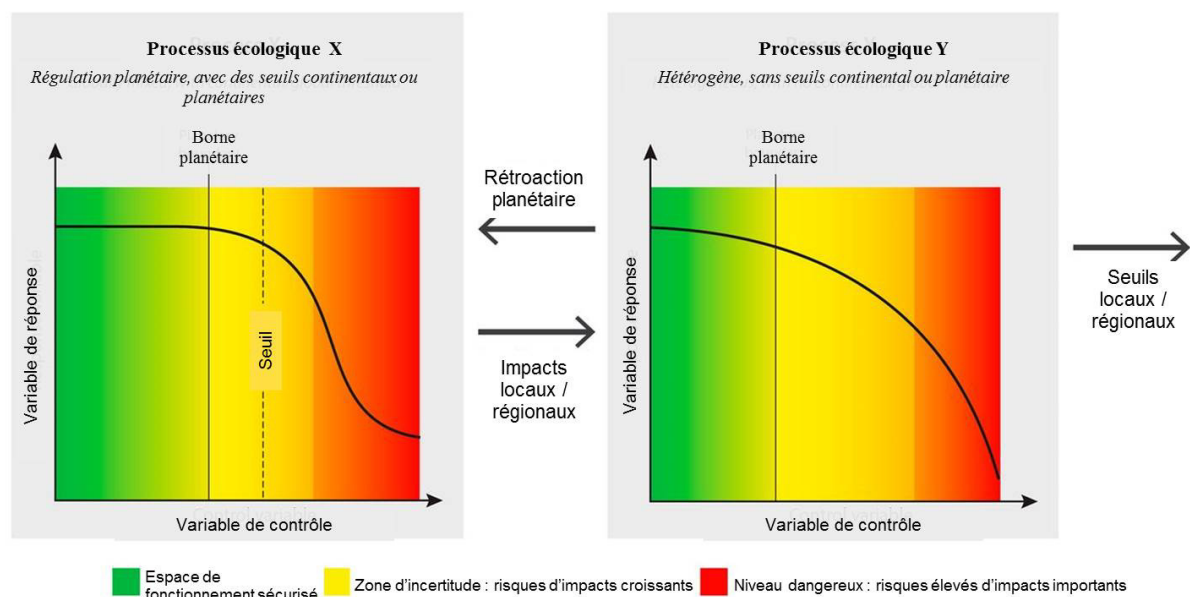
La notion de "**ecological threshold**" (que nous traduirons ici par "**seuil écologique**") avait été définie par (Groffman et al., 2006) comme *"le point auquel la qualité, les propriétés ou les phénomènes d'un écosystème changent brutalement ou lorsque des petits changements dans les facteurs écologiques d'un système provoquent des modifications importantes de l'écosystème"*. Groffman et al. Rappelent que la notion de seuil écologique a émergé dans les années 1970, à partir de l'idée que les écosystèmes présentent souvent plusieurs états d'équilibres stables selon les conditions environnementales.

(Steffen et al., 2015) est venu préciser ce concept afin d'actualiser et renforcer le cadre conceptuel de « l'espace de fonctionnement sécurisé » en précisant les différences entre **bornes planétaires** (« *boundary* ») et **seuil** (« *threshold* »).

Nous utiliserons le terme « **limite planétaire** » comme terme plus général pour nommer le thème environnemental qui fait l'objet d'un seuil écologique.

Une zone d'incertitude, parfois importante, est inhérente à chaque limite planétaire (zone jaune dans la figure ci-dessous). Cette incertitude est tout autant liée aux limites de la connaissance scientifique (stochastique ?) qu'à l'incertitude intrinsèque (épistémique ?) sur le fonctionnement du système Terre. Du côté "sécurisé" de la zone d'incertitude, la connaissance scientifique actuelle suggère que la

probabilité de traverser un “seuil critique” (“critical threshold”) est faible. A l’inverse, de l’autre côté de la zone d’incertitude, la connaissance scientifique actuelle suggère qu’il y a une probabilité forte que les changements du fonctionnement du système « Terre » affectent gravement les sociétés humaines. L’application du principe de précaution devrait nous conduire à établir des bornes planétaires du côté sécurisé de la zone d’incertitude. Cela ne signifie pas que la transgression des bornes nous conduise instantanément au désastre écologique, mais plus la borne est dépassée, plus le risque de rupture des équilibres écologiques est élevé, limitant ainsi les capacités de résilience des systèmes écologiques et notre capacité à se préparer à de tels changements (Steffen et al., 2015). Comme représenté sur la figure ci-dessous, les limites planétaires (« *planet boundary* ») initialement définies par (Rockström et al., 2009) ne sont pas équivalents aux seuils planétaires (« *global threshold* »). (Steffen et al., 2015) proposent que, pour un processus écologique donné, même lorsque l’existence d’un seuil est probable au niveau d’un bassin continental ou océanique, la *borne planétaire* soit placée en amont de la position du *seuil biophysique*, c’est-à-dire bien avant de l’atteindre. Cette proposition de l’établissement d’un « tampon » entre la *borne planétaire* que l’on se fixe et le *seuil biophysique* a pour objectif de prendre en compte non seulement l’incertitude liée à la position précise du seuil mais également de laisser le temps à la société de réagir aux signaux précoces.



Will Steffen et al. *Science* 2015;347:1259855

Figure 2. Le cadre conceptuel des limites planétaires, faisant apparaître l’espace de fonctionnement sécurisé, la zone d’incertitude, la position (probable) du seuil et la zone de hauts risques (Steffen et al., 2015)

Rockström et ses collègues (2009) avaient travaillé sur les limites planétaires, sans dissocier seuils et bornes. Ils reconnaissaient que les variables de contrôle sont géographiquement hétérogènes pour de nombreux processus écologiques. (Steffen et al., 2015) soulignent que des changements dans des variables de contrôle à l’échelle régionale peuvent influencer le fonctionnement de l’écosystème Terre

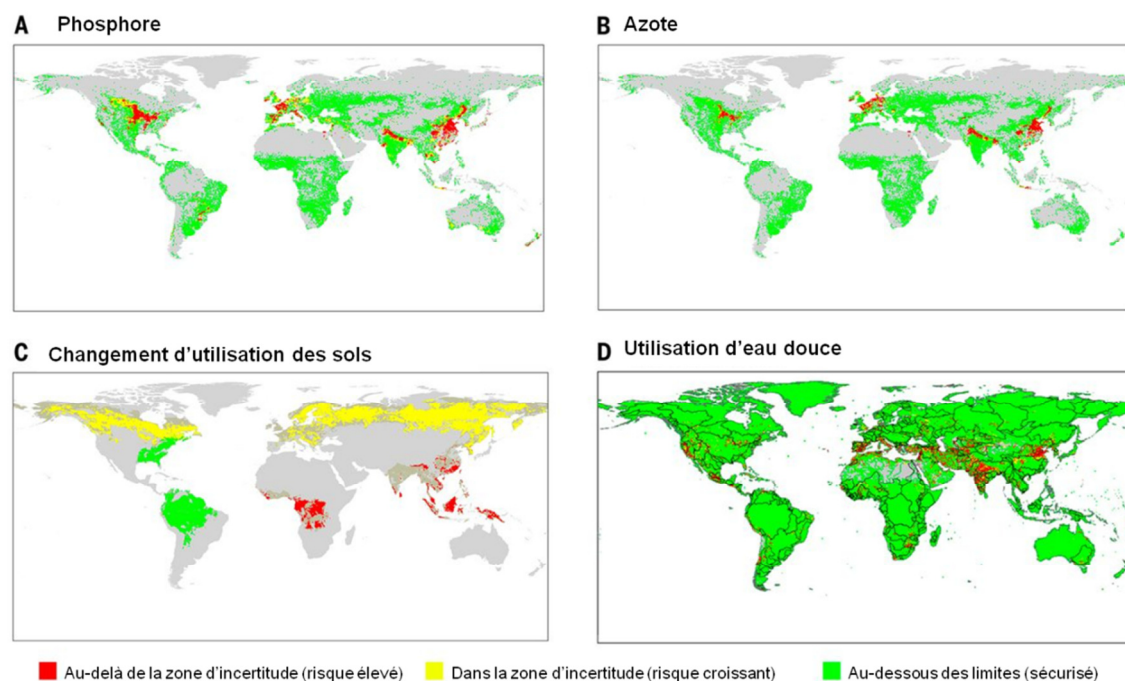
au niveau planétaire. Ces auteurs proposent donc la définition de limites régionales en interaction avec les limites planétaires.

Pour les processus écologiques où des dynamiques régionales jouent un rôle critique dans la dynamique planétaire, (Steffen et al., 2015) proposent un cadre à double niveau de variables de contrôle et de limites planétaires. Ainsi, le niveau géographique d'analyse des six limites planétaires étudiées n'est pas le même (Steffen et al., 2015) :

- Les modifications de l'intégrité de la biodiversité apparaissent au niveau des biomes terrestres, des grands écosystèmes marins ou d'eau douce
- En ce qui concerne la régulation biophysique du climat, l'échelle pertinente est celle du biome forestier²
- Les flux et utilisation d'eau douce s'effectuent à l'échelle des principaux bassins versants et doivent donc être caractérisés à des échelles éventuellement très locales.
- Les modifications des flux biogéochimiques, tels que les cycles du phosphore et de l'azote sont des flux planétaires qui agrègent des perturbations très locales mais potentiellement très fortes (dans des zones d'agriculture intensive). Ces deux niveaux d'analyse sont donc nécessaires.

La figure ci-dessous représente les distributions et le statut actuel, selon (Steffen et al., 2015) des variables de contrôle pour trois des limites planétaires pour lesquelles les dynamiques régionales sont critiques : cycles biogéochimiques, changement d'utilisation des sols et utilisation d'eau douce.

² Un biome est une région où se retrouve un ensemble d'éco-systèmes caractéristiques à une zone géographique et qui regroupe des espèces végétales et animales adaptées à ce climat spécifique (Etablissement vert Bruntland de la Centrale des Syndicats du Québec, 2013)



Will Steffen et al. Science 2015;347:1259855



Figure 3. Distribution régionale et statut actuel des variables de contrôle pour (A) les flux biogéochimiques de P; (B) les flux biogéochimiques de N; (C) les changements d'utilisation des sols; and (D) l'utilisation d'eau douce (Steffen et al., 2015).

Tableau 2. Actualisation des variables de contrôle et de leur valeur actuelle, pour les limites proposées et leur zone d'incertitude pour les neuf limites planétaires (Steffen et al., 2015).

	Control variable(s)	Planetary boundary (zone of uncertainty)	Current value of control variable
Climate change (R2009³: same)	Atmospheric CO ₂ concentration, ppm Energy imbalance at top-of-atmosphere, W m ⁻²	350 ppm CO ₂ (350-450 ppm) Energy imbalance: +1.0 W m ⁻² (+1.0-1.5 W m ⁻²)	396.5 ppm CO ₂ 2.3 W m ⁻² (1.1-3.3 W m ⁻²)
Change in biosphere integrity (R2009: Rate of biodiversity loss)	Genetic diversity: Extinction rate Functional: diversity: Biodiversity Intactness Index (BII) Note: These are interim control variables until more appropriate ones are developed.	Genetic: < 10 E/MSY (10-100 E/MSY) but with an aspirational goal of ca. 1 M/ESY* (the background rate of extinction loss). E/MSY = extinctions per million species-years Functional: Maintain BII at 90% (90-30%) or above, assessed geographically by biomes/large regional areas (e.g. southern Africa), major marine ecosystems (e.g., coral reefs) or by large functional groups	100-1000 E/MSY 84%, applied to southern Africa only
Stratospheric ozone depletion (R2009: same)	Stratospheric O ₃ concentration, DU	<5% reduction from pre-industrial level of 290 DU (5%-10%), assessed by latitude	Only transgressed over Antarctica in Austral spring (~200 DU)
Ocean acidification (R2009: same)	Carbonate ion concentration, average global surface ocean saturation state with respect to aragonite (Ω_{arag})	≥80% of the pre-industrial aragonite saturation state of mean surface ocean, including natural diel and seasonal variability (≥80%–≥70%)	~84% of the pre-industrial aragonite saturation state
Biogeochemical flows: (P and N cycles) [R2009: Biogeochemical flows: (interference with P and N cycles)]	P cycle: Global: P flow from freshwater systems into the ocean Regional: P flow from fertilizers to erodible soils N cycle: Global: Industrial and intentional biological fixation of N	P cycle: Global: 11 Tg P yr ⁻¹ (11-100 Tg P yr ⁻¹) Regional: 6.2 Tg yr ⁻¹ mined and applied to erodible (agricultural) soils (6.2-11.2 Tg yr ⁻¹). Boundary is a global average but regional distribution is critical for impacts. 62 Tg N yr ⁻¹ (62-82 Tg N yr ⁻¹). Boundary acts as a global 'valve' limiting introduction of new reactive N to Earth System, but regional distribution of fertilizer N is critical for impacts.	~22 Tg P yr ⁻¹ ~14 Tg P yr ⁻¹ ~150 Tg N yr ⁻¹
Land-system change (R2009: same)	Global: area of forested land as % of original forest cover Biome: area of forested land as % of potential forest	Global: 75% (75-54%) Values are a weighted average of the three individual biome boundaries and their uncertainty zones Biome: Tropical: 85% (85-60%) Temperate: 50% (50-30%) Boreal: 85% (85-60%)	62%
Freshwater use (R2009: Global freshwater use)	Global: Maximum amount of consumptive blue water use (km ³ yr ⁻¹) Basin: Blue water withdrawal as % of mean monthly river flow	Global: 4000 km ³ yr ⁻¹ (4000-6000 km ³ yr ⁻¹) Basin: Maximum monthly withdrawal as a percentage of mean monthly river flow. For low-flow months: 25% (25-55%); for intermediate-flow months: 30% (30-60%); for high-flow months: 55% (55-85%)	~2600 km ³ yr ⁻¹

³ (Rockström et al., 2009)

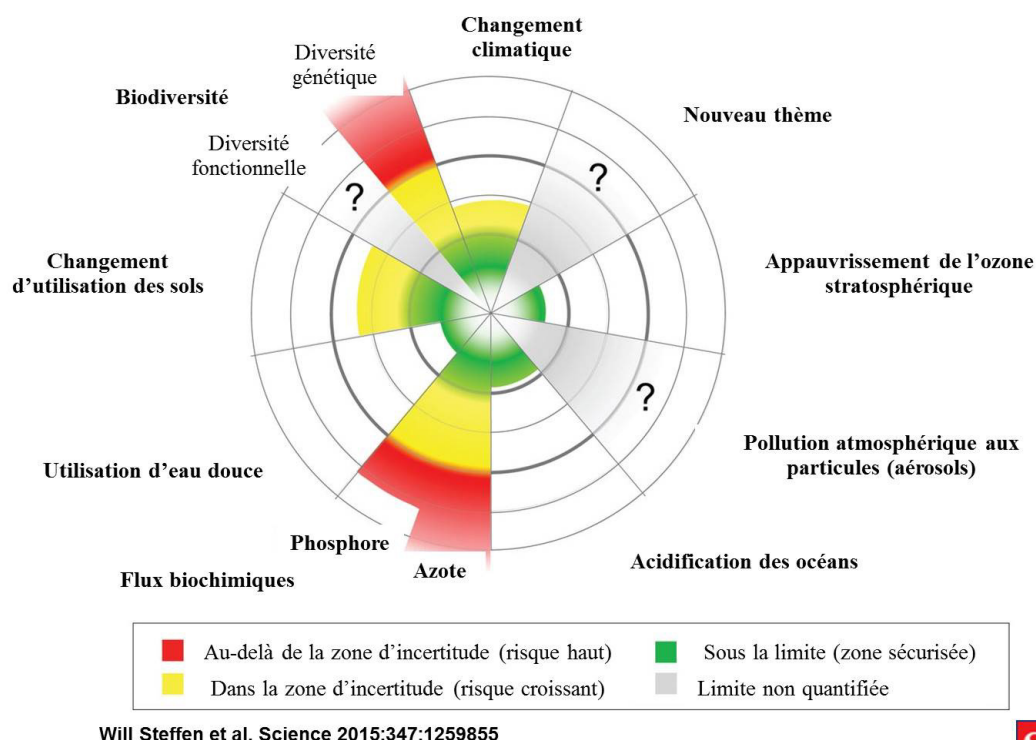


Figure 4. Statut proposé par (Steffen et al, 2015) des variables de contrôle pour sept limites planétaires.

La zone verte correspond à l'espace de fonctionnement sécurisé, la zone jaune correspond à la zone d'incertitude (risque croissant) et la zone rouge est une zone à haut risques.

Ces articles sont aujourd'hui largement discutés dans la littérature scientifique. Certains auteurs discutant du niveau d'atteinte des limites définis par (Rockström et al., 2009) et (Steffen et al., 2015). D'autres auteurs proposent de nouvelles limites planétaires à prendre en compte.

Par exemple, (Jaramillo and Destouni, G., 2015) suggèrent que la limite planétaire liée à la consommation en eau douce a déjà été dépassée. Selon ces auteurs, les travaux de (Steffen et al., 2015) prennent en compte les consommations des industries, municipalités, l'agriculture irriguée et les pertes d'évaporation liées aux réserves d'eau. Ces dernières ne prennent en compte que les pertes quantifiées à partir de la surface réelle des réserves. L'augmentation probable de l'évapotranspiration liée à l'élévation des niveaux d'eau autour des réservoirs d'eau est supposée être plus ou moins compensée par la diminution de l'évaporation dans les zones en aval des réserves (Jaramillo and Destouni, G., 2015). Cependant, selon (Jaramillo and Destouni, G., 2015), des études récentes ont montré des effets des barrages sur l'hygrométrie de l'air dans un rayon de 100 km autour des grandes réserves d'eau. La prise en compte de ces modifications sur l'évapotranspiration pourrait conduire à conclure que la borne planétaire en termes de consommation d'eau douce a déjà été dépassée. Un consensus scientifique sur l'importance de certains processus et leur quantification semble donc

nécessaire pour pouvoir proposer des bornes planétaires crédibles. Certaines incertitudes sont d'ordre stochastique et peuvent être réduites par l'accroissement des connaissances (obtention de chroniques environnementales avec traitements statistiques appropriés), d'autres à caractère plus épistémiques risquent de limiter la possibilité d'un consensus scientifique.

D'autres auteurs proposent la prise en compte de nouvelles limites planétaires. Par exemple, S. Running propose d'utiliser l'appropriation humaine de la productivité primaire nette, quantifiable, en complément de ceux proposés par J. Rockström et al., comme limite planétaire (Running 2012). En effet, les humains s'approprient 20 à 40 % de la productivité primaire nette et dégradent cette productivité du fait de la dégradation des habitats naturels (Haberl et al. 2007). Le fait de doper localement la productivité primaire nette par l'utilisation de nutriments tels que l'azote et le phosphore, a des conséquences environnementales bien connues aujourd'hui (dégradation des sols sur le long terme, pollution des eaux, etc.) (Haberl et al. 2007). S. Running souligne que la production primaire nette est associée à trois systèmes planétaires qui ont atteint leur limite selon J. Rockstrom et al : le changement climatique, le taux de perte en biodiversité et l'interférence de l'homme dans les cycles de l'Azote et du Phosphore. Elle est également liée au changement d'utilisation des sols ainsi qu'à l'utilisation d'eau douce. S. Running souligne le fait que la productivité primaire nette mondiale, d'environ 53,6 Pg (soit $53,6 \times 10^9$ tonnes) est remarquablement stable dans le temps. En dépit de fortes variabilités régionales des facteurs influençant cette productivité (radiations solaires, précipitations, en particulier), la productivité primaire nette (PPN) varie de moins de 0.001% par an au niveau mondial (Running 2012). Cette PPN semble donc déterminée par des contraintes planétaires. On ne peut donc pas escompter une augmentation substantielle de cette valeur. La question se pose alors de savoir si la biosphère peut supporter une augmentation de 40 % de la population mondiale, projetée pour 2050. Aujourd'hui, l'Homme utilise environ 38 % de cette PPN mondiale. La question devient donc de savoir si l'humanité peut s'approprier une fraction plus élevée de la PPN mondiale. Selon S. Running, 53 % de la PPN mondiale n'est pas exploitable (espaces préservées, zones sauvages, etc.). Il ne reste donc que 5 à 10 % de la PPN mondiale qui pourrait être mobilisée de surcroît. La question n'est donc plus, selon S. Running si les hommes vont atteindre la limite planétaire en termes d'appropriation de la PPN, mais quand ils vont l'atteindre... L'hypothèse d'augmentation de 40 % de la population, associée aux objectifs d'amélioration des conditions de vie pour les 5 milliards de terriens les plus pauvres implique un doublement de l'utilisation des ressources biologiques. Ce raisonnement conduit S. Running à suggérer que les limites planétaires à la croissance, estimées à partir de l'appropriation humaine de la productivité primaire nette, vont être atteintes dans moins d'une dizaine d'années (Running 2012). On voit ainsi que l'introduction de seuils biophysiques et écologiques sur les capacités de la planète à supporter le développement humain génère des questionnements qui dépassent la sphère scientifique et interrogent nos choix sociaux et politiques.

Ces questionnements sur le développement humain et la croissance matérielle étaient présents dès les premières publications du Club de Rome en 1972, et sont aussi relayées en matière énergétique par

Bardi (2012), qui souligne les limites de l'exploitation des ressources minières pour des raisons fondamentalement énergétiques, les réserves pouvant alors s'avérer très inférieures aux ressources. Le développement humain influe sur la pollution chimique, pour laquelle Rockström et al. (2009) n'ont pas défini de seuil.

Cet exemple montre que la définition de bornes biophysiques et écologiques sur les capacités de la planète à supporter le développement humain soulève des questionnements qui dépassent la sphère scientifique et interrogent nos choix sociaux, politiques, économiques et philosophiques.

Certaines publications commencent à proposer des « **budgets écologiques** » (« planet boundary allowance ») (ex. (Doka, 2015)) ou des « indicateurs de durabilité écologique absolue » (« Absolute environmental sustainability indicators » (AESI)) (Bjørn and Hauschild, 2015)). Mais la définition des bornes, et a fortiori sa répartition par personne et dans le temps, implique outre l'incertitude scientifique, d'autres critères que les critères scientifiques et écologiques : critères socio-économiques, considérations politiques (les difficultés des négociations internationales autour de la question du changement climatique en sont une illustration), mais également philosophiques.

Nous avons souhaité aborder ces questionnements dans nos réflexions menées dans le cadre du projet REPIS. L'équipe qui constitue le projet REPIS est pluridisciplinaire (chercheurs en sciences et génie de l'environnement et un économiste). Les activités de ses membres sont plutôt centrées autour de l'évaluation environnementale au niveau local (territoires, entreprises, installations de traitement de déchets). Un des verrous scientifiques importants de l'évaluation environnementale à ce niveau concerne l'interprétation des résultats de l'estimation des pressions environnementales. En effet, comment, à cette échelle, comparer entre elles des pressions sur des impacts difficilement commensurables. Par exemple, quelle importance relative donner à des émissions de gaz à effet de serre versus des consommations en eau ? Aucune méthode consensuelle n'existe aujourd'hui pour réduire à une note unique la dizaine d'indicateurs d'impacts généralement estimés. Deux méthodes sont principalement utilisées pour ramener des indicateurs incommensurables à des indicateurs soit sans unité (la « normation ») soit avec une unité monétaire commune (la « monétarisation ») (Rethoré, 2010).

Ces méthodes impliquent des hypothèses fortes, souvent implicites (Méry 2010). L'objectif initial de ce projet était ainsi d'envisager les possibilités d'utilisation de ces indicateurs à une échelle plus « micro » (pour un territoire, une organisation, par exemple). la démarche a donc été d'identifier des thèmes présentant des seuils d'irréversibilité, de choisir, au sein de chaque équipe impliquée dans le projet, le ou les thèmes qu'elle souhaitait aborder de par son positionnement préalable de recherche, puis d'identifier en quoi la notion de seuil pouvait s'appliquer

ARMINES Saint-Etienne a choisi d'explorer les possibilités, tant sur un plan scientifique et méthodologique qu'éthique et politique, de fixer un « budget carbone » global et par personne à ne pas dépasser. Ces réflexions ont été menées dans le cadre du stage de master 2 en Ethique et

Développement Durable à l'université Jean-Moulin Lyon 3, de Benoit Leclerc. Les présupposés philosophiques associés à la recherche de bornes planétaires ont donc été explorés dans ce cadre.

IRSTEA Antony a exploré, dans le cadre du stage de Solène David (étudiante au master recherche Systèmes Territoriaux, Aide à la Décision et Environnement) la question de la rareté foncière dans le contexte des installations de stockage des déchets, où des composantes sociales (capacités de mobilisation locale, par exemple) et économiques (coûts du foncier, par exemple), et non seulement écologiques, interviennent dans l'établissement d'un seuil de soutenabilité pour le traitement des déchets.

ARMINES-Alès a exploré les aspects liés à la consommation et aux rejets de phosphore liés aux activités d'un territoire en utilisant l'ACV territoriale pour estimer les flux directs ou indirects. Ces flux ont été mis en relation avec différentes limites ou seuils d'irréversibilités locaux ou globaux. Un CDD d'Alvaro Gonzalez Roof a permis de réaliser ce travail.

S'intéresser aux seuils écologiques et aux irréversibilités associées suppose d'explicitier notre approche du traitement des incertitudes (non probabilisables, ressortant du principe de précaution) et des risques (probabilisables, et donc exprimables en termes d'utilité espérée). Pourquoi en effet s'inquiéter de l'existence de ces seuils et des irréversibilités associées ? C'est qu'en termes conséquentialistes que n'aurait pas reniés Pascal, les conséquences peuvent être jugées infiniment négatives (par exemple, la disparition de la race humaine sur terre, contrairement à l'idée d'un développement durable) aussi faible leur probabilité fût-elle, justifiant tout effort présent de les éviter. Ce raisonnement peut fonder lexicographiquement notre gestion des incertitudes, n'excluant en effet pas l'existence de fait de coûts d'opportunité de capitaux financiers et humains limités : une fois admis que nous devons faire tout ce qu'il est possible pour maintenir la race humaine sur terre (objectif anthropocentré ici assumé), les capitaux disponibles doivent être utilisés le plus efficacement possible. Ainsi, contrairement à certains économistes qui voudraient calculer le coût social d'une atteinte irréversible à l'environnement par une perpétuité écologique (valant l'inverse d'un taux d'actualisation supposé constant sur un horizon temporel infini empêchant par construction qu'un dommage pour l'éternité soit infiniment regrettable (Koopmans, 1960)) et ainsi intégrer les catastrophes écologiques dans une simple analyse marginale coût-bénéfice où la substituabilité entre production privée et environnement serait au cœur du débat sur l'évaluation sociale de la qualité environnementale (Guesnerie et al, 2012 ; Guéant et al, 2012), d'autres suggèrent que « *sustainability values may be more important than efficiency values around and below threshold limits. In short, sustainability values may be lexicographically superior to efficiency values* » (Farber et al, 2002). Sur un plan plus philosophique, on pourra se reporter à Dupuy (2004) et Bronner (2010) pour avoir deux approches contrastées des fondements et applications du principe de précaution.

En termes d'actions publiques et privées, la notion de seuil et d'irréversibilité est également importante, car l'action dépend de l'existence d'informations pertinentes. Or les signaux nous

informant qu'un seuil est en passe d'être franchi peuvent être faibles, ambigus, tardifs, voire postérieurs au franchissement du seuil, rendant alors toute action vaine et les dommages inévitables. L'information a donc une valeur (éventuellement infinie), et cette valeur peut justifier l'élaboration d'indicateurs environnementaux guidant l'action.

Un des grands intérêt de la modélisation est qu'elle permet d'anticiper des scénarii catastrophes qu'il serait malvenu d'expérimenter en grandeur réelle et de quantifier la notion de résilience, initialement développée en ingénierie (caractérisation par la vitesse de retour d'un système à son état initial après perturbation, illustrée par la pente du bassin d'attraction) puis élargie à l'écologie (caractérisation par la possibilité du système de changer d'état et illustrée par la largeur du bassin d'attraction). L'écologie théorique, en exploitant la théorie mathématique des systèmes dynamiques, a exploré comment des systèmes écologiques simples pouvaient signaler leur possible basculement. Dans le cas du système climatique, on en est certes encore loin (Leclerc, 2015) mais le simple fait de savoir qu'un système peut réagir plus faiblement, plus lentement ou plus irrégulièrement près de son seuil de basculement (Scheffer, 2001) montre tout l'intérêt de se donner les moyens d'avoir des séries temporelles longues sur les variables d'état d'un système et de pouvoir les traiter statistiquement. Toutefois, on a pu simuler des basculements sans signaux précoces « early warning signals » (Hastings et Wisham, 2010) tout comme des signaux précoces sans qu'il y ait basculement (Dakos et al, 2014)...

3.2 Résilience

Poser la question des limites planétaires nécessite d'aborder la question de la résilience des systèmes écologiques, mais aussi anthropiques et donc économiques et sociaux, affectés par le dépassement de ces limites. Sans prétendre synthétiser la littérature, déjà très abondante sur la question, nous nous contenterons ici de reprendre les deux définitions de la résilience proposée par (Groffman et al., 2006).

La définition de la *résilience technique (ou mécanique)* (traduction de « *engineering resilience* ») peut être définie comme le temps nécessaire à un système pour se rétablir après avoir subi une perturbation. La *résilience écologique* (qui nous intéresse plus particulièrement) définirait la quantité de pressions nécessaire pour faire passer un écosystème au-delà d'un seuil écologique le faisant passer d'un état A à un état B (Groffman et al., 2006). Cette résilience écologique émerge des interactions entre la diversité fonctionnelle, la diversité des réactions ainsi que de la diversité inter-échelle des écosystèmes. Ainsi, la résilience écologique d'un écosystème est modifiée par les ruptures écologiques se produisant dans les écosystèmes voisins.

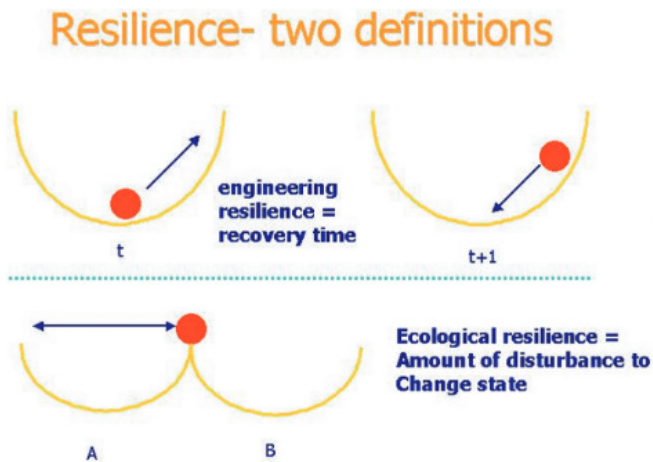


Figure 1. Definitions of resilience have changed over the last two decades from an “engineering resilience” concept based on how quickly a system recovers from disturbance (*top*), to an “ecological resilience” that considers the amount of disturbance necessary to change the state of an ecosystem, pushing it over the “ecological threshold” from state A to state B. From Gunderson (2000).

Figure 5. Les deux définitions de la résilience (Groffman et al., 2006)

Une façon très générale d’exprimer la résilience et donc la durabilité de l’état (souhaité) d’un système est la théorie de la viabilité : sous réserve de connaître les lois de comportement du système, des théorèmes permettent d’assurer l’existence et d’identifier des états initiaux du système restant indéfiniment (ou pendant une période de temps donnée) dans un « safe operating space » (pour reprendre les termes de Rockström).

Développée en France par J.P. Aubin, cette théorie a fait l’objet d’applications environnementales par Alvarez et Martin (2010) , en particulier dans le cas écologiquement simple des lacs oligotrophes. Mais dans quelle mesure peut-on passer de l’analyse de la viabilité d’un tel système simplifié à celle d’une planète entière (devant respecter les seuils proposés par Rockström par exemple) ? En particulier, l’état d’un lac est supposé homogène par tranche de profondeur, alors que tout géographe sait que la planète, et en particulier le milieu terrestre, peut être écologiquement très contrasté (voir les oppositions classiques adret-ubac des régions méditerranéennes, qui peuvent être très locales, ou les variations de conditions hydriques au sein d’un seul continent). De ce fait, et prenant ici une approche explicitement anthropocentrée pour l’action : dans quelle mesure un système local peut-il basculer sans que le système global le fasse, et inversement, dans quelle mesure le système planétaire peut-il basculer sans que certains systèmes locaux le fassent ? Quelles interactions entre processus multi-scalaires dans l’espace et le temps ? Comment intégrer les comportements humains individuels et collectifs réels (pas que ceux, idéalisés) d’une économie néo-classique peu à même d’intégrer la possibilité d’effondrements à cause environnementale (Diamond, 2006) ou sociale (Tainter, 2013) ?

4 Approche scientifique et technique et résultats obtenus

4.1 Réflexions pour l'établissement de « budgets carbone » (stage de Benoit Leclerc, Mines Saint-Etienne)

Le master de Benoit Leclerc (Mines Saint-Etienne) a eu pour objectif de contribuer à la réflexion quant à la possibilité et à la pertinence, tant scientifique que philosophique ou politique d'établir des « budgets carbone » par personne (Leclerc, 2015). Le seul « seuil » qui semblent aujourd'hui faire consensus au sein de la communauté scientifique et politique internationale, même s'il est contesté par certains scientifiques qui l'estiment déjà trop élevé, porte sur l'état de l'environnement (et non sur les pressions). Il est donc exprimé en degrés : Limiter le changement climatique à un réchauffement global de moins de 2 °C⁴. A partir de ce seuil, certains auteurs tels que Meinshausen et al (2009) ⁵, (UNEP, 2013) ou (Hoekstra and Wiedmann, 2014) proposent des « budgets carbone » à ne pas dépasser.

Ce type de « budget », établi sur des bases scientifiques d'acceptabilité des milieux (et non basé sur les émissions actuelles tels que l'envisagent les gouvernements actuels⁶) pourrait être mis en corrélation avec l'empreinte carbone et de se décliner à de nombreuses échelles (temporelles comme spatiales).

Cependant, comme le soulignent Hansen et al (2008) : « Les points de non-retour [ce que nous appelons ici les “seuils écologiques”] sont intrinsèquement difficiles à définir, car les problèmes dynamiques sont non linéaires. Les modélisations existantes sont plus léthargiques que les phénomènes qui se déploient dans le monde réel... » (Hansen et al., 2008).

4.1.1 Récapitulatif et comparaisons des différents « budgets carbone » proposés.

Plusieurs « budgets carbone » sont proposés à partir de diverses méthodes et modélisations. L'objectif de ce projet n'était pas tant de proposer un nouveau « budget carbone » mais d'identifier les différentes méthodes possibles à cette fin ainsi que les limites inhérentes à cet exercice.

Le numéro 458 de la prestigieuse revue *Nature*, consacré au « Coming climate crunch » [la crise climatique s'approche, notre traduction], a publié, en 2009, deux articles proposant des « budgets carbone » : (Meinshausen et al., 2009) et (Allen et al., 2009).

⁴ Accord de Copenhague de 2009 (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/L-Accord-de-Copenhague,21485.html>)

⁵ Meinshausen et al 2009. « Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. » *Nature* 458

⁶ Voir par exemple le projet de décret relatif aux budgets carbone nationaux et à la stratégie nationale bas-carbone, 2015, Ministère de l'Ecologie, du développement durable et de l'énergie disponible sur http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2015-08-18_DEVR1519707D_d_R_cret_budgetsC.pdf ainsi que les différentes contributions prévues par les différents Etats en vue de la COP 21 (Intended Nationally Determined Contributions (INDCs)) disponibles sur <http://www4.unfccc.int/submissions/indc/Submission%20Pages/submissions.aspx>

M. Allen précise que les modèles utilisés par leur étude suggèrent que la relation entre les émissions cumulées sur une période donnée et la courbe du réchauffement climatique est remarquablement indépendante du chemin de réduction des émissions (calendrier des émissions ou forme de la courbe d'émissions). Ainsi, les objectifs politiques basés sur des limites d'émissions cumulées de dioxyde de carbone sont probablement plus robustes à l'incertitude scientifique que des objectifs en termes de taux d'émission ou de concentration. Cela explique probablement pourquoi les études que nous avons recensées ne se hasardent pas à proposer des « budgets carbone » par habitant (ce qui rend pourtant plus facile l'interprétation des émissions générées par les différents systèmes étudiés au regard de ces « budgets carbone » cibles.

En 2013, une publication du programme des Nations Unies pour l'Environnement, intitulée « The emission gap » a pour vocation d'alerter sur le fossé existante entre, d'une part, les niveaux d'émissions qui seraient nécessaires, en 2020, pour respecter l'objectif d'une élévation de la température moyenne mondiale de 2°C et, d'autre part, les niveaux d'émissions correspondant aux engagements des pays dans le cadre des négociations internationales sur le climat. Ces engagements s'avérant largement insuffisants à l'horizon, l'humanité devra alors mettre en place des moyens plus difficiles, plus coûteux et plus risqués afin de respecter l'objectif des 2°C (UNEP, 2013).

Tableau 3. Budgets carbone proposés selon différentes hypothèses

Article	Période d'émission	Budget d'émissions CO ₂ proposé pour la période	Moyenne annuelle (nos calculs)
(Meinshausen et al., 2009) 80 % de probabilité de respecter la limite des 2°C	2000-2049	890 Gt CO ₂ pour 50 ans (~234 Gt CO ₂ émises entre 2000 et 2006)	17,8 Gt CO ₂ / an
(Meinshausen et al., 2009) 75 % de probabilité de respecter la limite des 2°C	2000-2049	1000 Gt CO ₂ pour 50 ans (~234 Gt CO ₂ émises entre 2000 et 2006)	20 Gt CO ₂ / an
(Meinshausen et al., 2009) 50 % de probabilité de respecter la limite des 2°C	2000-2049	1437 Gt CO ₂ pour 50 ans	28,74 Gt CO ₂ / an
(UNEP, 2013) 66 % de probabilité de respecter la limite des 2°C Scénario basé sur des émissions négatives (séquestrations de carbone à partir de 2010)	Objectifs pour 2020		44 GtCO _{2e} /an, réduisant rapidement ensuite (~50,1 Gt CO ₂ émise/an en 2010) (~59 Gt CO ₂ émise/an estimé en 2020 si business-as-usual))
	Objectifs pour 2050		22 GtCO _{2e} /an
(UNEP, 2013) 66 % de probabilité de respecter la limite des 2°C Scénario sans émissions négatives (séquestrations de carbone à partir de 2010)	Objectifs pour 2020		40 GtCO _{2e} /an, réduisant rapidement ensuite (~50,1 Gt CO ₂ émise/an en 2010) (~59 Gt CO ₂ émise/an estimé en 2020 si business-as-usual))
	Objectifs pour 2050		20 GtCO _{2e} /an

Même si les auteurs ne se hasardent pas à ramener ses chiffres par an et par habitant, nous pouvons nous hasarder à estimer la correspondance de ces « budgets carbone » mondiaux en émissions annuelles par an.

Nous pouvons considérer une population de 7 324 779 habitants, en 2015⁷.

Pour estimer les émissions de CO₂, nous nous baserons sur les données du Global Carbon Project du CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) qui propose une base de données très complète entre 1959 et 2013 sur les émissions de carbone liées à la combustion des énergies fossiles et la production de ciment⁸. Ces données sont disponibles sur http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html. Nous obtenons ainsi une émission de 494 GtCO₂ pour la période de 2000 à 2015. L'ordre de grandeur est cohérent, bien que légèrement inférieur à l'émission estimée au prorata temporis de celle proposée par (Meinshausen et al., 2009) pour la période 2000-2006 (~234 Gt CO₂ émises entre 2000 et 2006). Les données du CDIAC s'arrêtent en 2011. Afin d'avoir une estimation des émissions de 2000 à 2015, nous considérons que les émissions de 2012 à 2015 sont égales à celles de 2011. Nous ne cherchons ici qu'à obtenir un ordre de grandeur. Cela donne une émission moyenne mondiale, sur cette période, de 4,5 t CO₂/hab/an.

En ce qui concerne les hypothèses de « budget carbone », nous nous reposerons sur les résultats de (Meinshausen et al., 2009) qui nous semblent reposer sur de solides bases scientifiques (article publié dans la revue *Nature*).

Sur le budget carbone proposé en 2009 par M. Meinshausen et ses collègues pour la période 2000 - 2049, il faut donc retirer les émissions déjà émises entre 2000 et 2015, puis diviser par la population mondiale (en 2015) et par 34 (nombre d'années restant d'ici 2049). Pour cet exercice, nous utiliserons le nombre d'habitant de la planète en 2015, mais il est évident que si la population mondiale augmente, le « budget carbone » par habitant et par an diminuera proportionnellement.

La formule d'estimation du « budget carbone » par an et par habitant est donc simple :

$$BudgetCO2_{/an.hab} \left[\frac{tCO_2}{an} . hab \right] = \frac{(BudgetCO2_{Gt(2000-2050)} - EmissionsCO2_{Gt(2000-2015)})}{(Pop_{mondiale} * 35)} * 10^9$$

⁷ Source INED : <http://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/chiffres/tous-les-pays-du-monde/>

⁸ Boden, TA, Marland, G and Andres, RJ 2013. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA doi 10.3334/CDIAC/00001_V2013 et-Houghton, RA, van der Werf, GR, DeFries, RS,

Tableau 4. Nos estimation de budget carbone par an et par habitant pour respecter le seuil des 2°C à partir des résultats de (Meinshausen et al., 2009)

Probabilité de chances que la température mondiale moyenne n'augmente pas de plus de 2°C (Meinshausen et al., 2009)	Budget d'émissions CO ₂ proposé par (Meinshausen et al., 2009) pour 2000-2050 en Gt CO ₂	Budget carbone par an et par habitant (en tCO ₂ / hab/an) (nos calculs)
80%	890 Gt CO ₂	1, 55 tCO ₂ / hab/an
75 % C	1000 Gt CO ₂	1,97 tCO ₂ / hab/an
50 %	1437 Gt CO ₂	3,68 tCO ₂ / hab/an

Il apparait ainsi que ces trois seuils, y compris celui ne présentant que 50% de chance de limiter l'augmentation globale de température en deçà des 2°C sont bien en dessous de la moyenne mondiale actuelle des émissions par an et par habitant (environ 4,5 t CO₂/hab/an). Notons de surcroît que nous n'ont été intégrées dans ces calculs d'émissions que les émissions de CO₂ liées à la combustion des combustibles fossiles (plus la fabrication du ciment). Nous n'avons pas pris en considération, dans les émissions, celles liées au changement d'utilisation des terres qui est pris en compte dans le « budget carbone » proposé par M. Meinshausen et ses collègues. Ces résultats montrent bien l'importance de l'effort à accomplir dans nos modes de consommation et production pour essayer de maintenir la température mondiale moyenne dans des limites considérées comme raisonnables par les scientifiques spécialistes du climat.

L'approche choisie par l'UNEP est un peu différente. Ce rapport réalise ses modélisations à partir d'un contexte donné qui est celui des émissions actuelles de CO₂ et propose une diminution graduelle des émissions afin d'arriver en 2075-2100 à un budget négatif, supposant une séquestration anthropique du carbone. Par contraste, les résultats présentés précédemment ne se positionnent pas temporellement, il ne s'agit donc pas d'établir un programme de réduction des émissions de CO₂, mais un seuil à ne pas dépasser sur une période de 100 ans sans considération pour l'année à laquelle débute cette démarche. Ainsi cela suppose une stabilisation des émissions anthropiques de CO₂ en amont. Il est donc possible de dire que ces seuils se présentent comme des objectifs sur le très long terme et devront être précédés de seuils et de mesures tels que ceux proposés par l'UNEP : graduels.

4.1.2 Limites de ces calculs

De nombreux points suggèrent toutefois une grande prudence dans l'éventualité d'une utilisation politique de ces seuils.

4.1.2.1 Incertitudes liées aux données

Il est ainsi important de souligner que s'il a été possible d'estimer des budgets carbone par habitant, ceux-ci cumulent de nombreuses **incertitudes** qu'il s'agit de prendre en considération dans le choix d'établissement d'un budget politique.

Par exemple la base de données utilisée pour les émissions de CO₂, celle du CDIAC⁹, annonce de grandes marges d'incertitudes. Les **sources d'erreurs qui se répercutent dans les bases de données** sont multiples, car nous connaissons mal les phénomènes, toujours plus nombreux, qui interagissent avec le climat. De plus, les méthodes de prises de données sont multiples, hétérogènes et n'offrent pas toujours des résultats concordants. Cela impose de conserver un regard critique sur ces calculs et résultats.

Les incertitudes scientifiques liées aux capacités d'absorption du carbone par les différents compartiments de l'environnement sont également élevées. En effet, plusieurs types de réservoirs de carbone (lithosphère, hydrosphère, atmosphère et biosphère) interagissent entre eux dans le cycle du carbone. Les différents flux de ce cycle ne sont pas constants dans le temps. Seule la lithosphère a la capacité de stocker le carbone sur le très long terme, sous forme fossile. Les flux absorbés par les puits terrestres et océaniques sont plus instables. Les puits océaniques, s'ils sont mieux compris que les puits terrestres, restent difficilement quantifiables. Ainsi l'incertitude liée aux puits océaniques s'élève à 20 % (Le Quéré, 2010). Celle concernant les puits terrestres est presque le double (35 %) et les variations d'une année à l'autre sont bien plus grandes (Le Quéré, 2010). Les causes de ces variations sont nombreuses et encore mal comprises : la vitesse de croissance de la végétation peut être modifiée avec l'évolution du taux de CO₂ de l'atmosphère, les phénomènes de tel qu'El Niño qui semble entraîner une hausse des émissions de carbone ou La Niña qui semble entraîner un accroissement de l'absorption du carbone, etc. D'autre part, l'incertitude est très élevée quant au rôle exercé par les **changements d'attribution et d'utilisation des sols** (LULUCF : Land Use, Land Change and Forestry). Enfin, de nombreuses rétroactions (fertilisation au carbone et appauvrissement des sols notamment) entraînent une baisse de nutriments et donc une baisse de la capacité d'absorption de CO₂ par les terres par le biais de la végétation et de la photosynthèse. Ainsi, les différentes publications proposant des seuils reposent sur des hypothèses différentes, conduisant à des écarts importants entre les différents « budgets » proposés. Et encore, il ne s'agit là que des réflexions sur le CO₂, gaz à effet de serre probablement le mieux connu aujourd'hui tant en termes d'émissions anthropiques que de cycle. Les autres gaz à effet de serre (méthane, protoxyde d'azote, hydrochlorofluorocarbures, etc.) devraient également faire l'objet de « budgets » également.

⁹ CDIAC Global Carbon budget Version 1.0 2014

4.1.2.2 Comparer des flux et des stocks

Un autre point à souligner est le fait que cet exercice implique la mise en relation de **flux** (émissions) avec des **stocks** (concentrations). Les sources de données, et donc les données utilisées, sont donc hétérogènes. Elles sont donc difficilement comparables entre elles, d'autant plus que les périmètres des émissions prises en compte peuvent différer (émissions de CO₂, émissions de CO₂ eq, prise en compte ou non du changement d'utilisation et affectation des terres, etc.). Il faut ainsi être prudent vis-à-vis des risques de **double comptage** de certaines données. Ceci d'autant plus que la « **durée de vie** » dans les différents compartiments de l'environnement (atmosphère, hydrosphère, etc.) des éléments chimiques (carbone, par exemple, mais cela peut être vrai pour d'autres éléments) est estimée et suit des lois de probabilité statistique. Il ne s'agit pas d'une valeur fixe invariable.

Ainsi, dans le cadre du carbone, nous nous sommes appuyés sur l'hypothèse selon laquelle la totalité du CO₂ atmosphérique se renouvelle tous les 100 ans, tout en prenant en compte le fait qu'entre 15 % et 40 % du CO₂ resterait dans l'atmosphère durant des milliers d'années. Mais le carbone suit une loi de décroissance sur plusieurs centaines d'années. Prendre en compte une durée de vie donnée est donc une hypothèse simplificatrice importante.

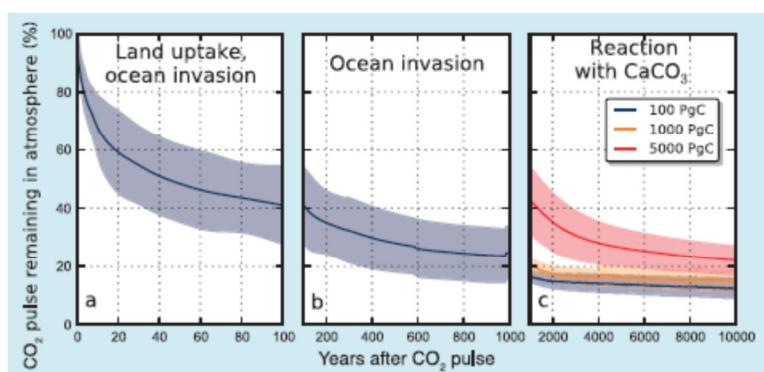


Figure 6. Pourcentage de CO₂ restant dans l'atmosphère en réponse à une émission (théorique) instantannée de CO₂ (IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013)

4.1.2.3 Des écarts considérables entre les seuils

La prise de conscience d'un monde comme système complexe, interconnecté, couplé à un *pouvoir*, entendu comme *capacité d'agir et d'impacter*, humain toujours croissant impose une prise de responsabilité et d'humilité : « Une maîtrise de notre maîtrise » (Jonas, 1979), c'est-à-dire une maîtrise morale/éthique de notre maîtrise technique.

Le « principe responsabilité » proposé par Hans Jonas, père du principe de précaution¹⁰, devrait s'incarner tout particulièrement dans le cas de l'élaboration d'un budget de carbone politique à respecter

Cela est d'autant plus important dans le cadre qui a été défini ici. En effet, force est de constater qu'il reste des **écarts considérables** entre les différents seuils, selon les hypothèses effectuées, et que les mesures à prendre dans un cas ne seront pas les mêmes que celles à prendre dans un autre où le seuil est 2 à 3 fois plus élevé. Par exemple, en se basant sur d'autres hypothèses que celles de (Meinshausen et al., 2009), G. Doka propose de fixer un budget carbone de 1,15 t CO_{2eq} /pers.an (Doka, 2015), tandis que Bjorn et al (2015) proposent comme référence de normalisation 0,985 t CO_{2eq} /pers.an pour une borne planétaire de 2°C d'augmentation de la température moyenne mondiale et 0,522 t CO_{2eq} /pers.an pour la borne planétaire, également suggérée par (Rockström et al, 2009) d'une augmentation de 1W/m² du forçage radiatif.

4.1.2.4 Un seuil parmi d'autres

Les seuils élaborés ici concernent le CO₂, **il est donc important de les placer aux côtés des seuils de chacun des différents GES**. Si le CO₂ est le gaz à effet de serre le plus souvent mis en cause dans les questions de réchauffement climatique (65 % seulement en moyenne entre 2008 et 2013), il est dangereux de négliger les autres. Le méthane notamment a une grande importance dans les questions de réchauffement climatique (Dessus et al., 2008).

Ces budgets de CO₂ sont largement dépassés dans beaucoup de pays ainsi que par la moyenne mondiale des émissions de CO₂. Cela est d'autant plus inquiétant si l'on prend en considération que celui-ci n'inclut pas tous les GES et que la situation pourrait alors être encore plus alarmante qu'il n'y paraît à la seule lumière de ces données.

Il est toutefois exclu d'appliquer, dans le cadre de cette première étude exploratoire, les différents GES en CO_{2eq} des pays à ces seuils de CO₂, car les autres GES, ayant leurs propres cycles, nécessiteraient d'adapter les seuils en conséquence. Si l'exercice ne nous semble pas impossible, les calculs à mettre en œuvre seront plus complexes (prise en compte des intégrales des courbes de concentration et de capacité de réchauffement global dans le temps pour les différents gaz).

Le tableau ci-dessous rend compte de la différence que cela peut représenter :

¹⁰ « En cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement. » Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement A/CONF.151/26 (Vol. I) 12 août 1992 <http://www.un.org/french/events/rio92/aconf15126vol1f.htm>

Table 1 | Probabilities of exceeding 2 °C

Indicator	Emissions	Probability of exceeding 2 °C*		Illustrative default case†
		Range		
Cumulative total CO ₂ emission 2000–49	886 Gt CO ₂	8–37%	20%	
	1,000 Gt CO ₂	10–42%	25%	
	1,158 Gt CO ₂	16–51%	33%	
	1,437 Gt CO ₂	29–70%	50%	
Cumulative Kyoto-gas emissions 2000–49	1,356 Gt CO ₂ equiv.	8–37%	20%	
	1,500 Gt CO ₂ equiv.	10–43%	26%	
	1,678 Gt CO ₂ equiv.	15–51%	33%	
	2,000 Gt CO ₂ equiv.	29–70%	50%	
2050 Kyoto-gas emissions	10 Gt CO ₂ equiv. yr ^{–1}	6–32%	16%	
	(Halved 1990) 18 Gt CO ₂ equiv. yr ^{–1}	12–45%	29%	
	(Halved 2000) 20 Gt CO ₂ equiv. yr ^{–1}	15–49%	32%	
	36 Gt CO ₂ equiv. yr ^{–1}	39–82%	64%	
2020 Kyoto-gas emissions	30 Gt CO ₂ equiv. yr ^{–1}	(8–38%)†	(21%)†	
	35 Gt CO ₂ equiv. yr ^{–1}	(13–46%)†	(29%)†	
	40 Gt CO ₂ equiv. yr ^{–1}	(19–56%)†	(37%)†	
	50 Gt CO ₂ equiv. yr ^{–1}	(53–87%)†	(74%)†	

* Range across all priors reflecting the various climate sensitivity distributions with the exception of line 12 in Fig. 3a.

† Note that 2020 Kyoto-gas emissions are, from a physical perspective, a less robust indicator for maximal twenty-first century warming with a wide scenario-to-scenario spread (Supplementary Fig. 1c).

‡ Prior chosen to match posterior of ref. 19 with uniform priors on the TCR.

Tableau 5. probabilité de dépasser les 2 °C relativement aux émissions de CO₂ et CO_{2e} (Meinshausen et al., 2009)

D'autre part, le changement climatique n'est qu'un des différents thèmes proposés par (Rokxtröm, 2009) comme limite planétaire. Ainsi, (Bjorn et Hauschild, 2015) se proposent d'établir non pas des « budgets écologiques » par personne, mais un cadre de normalisation basé sur les capacités de charges planétaires (carrying-capacity based normalisation) afin de mettre en relation les scores des indicateurs quantifiés dans le cadre d'ACV avec les capacités de charges des écosystèmes affectés dans le cadre d'une méthode orienté impacts (de type « midpoint »). Il s'agit ainsi de normaliser les différents indicateurs fournis par l'ACV en fonction de « références de normalisation » moyennes qui reflètent les bornes écologiques sélectionnées pour différents indicateurs de l'ACV (changement climatique, déplétion de la couche d'ozone, formation d'ozone photochimique, acidification terrestre, eutrophisation terrestre, eutrophisation des eaux douces et marines, écotoxicité pour l'eau douce, utilisation des terres, ressources en eau). Il ne s'agit donc pas ici de définir des objectifs politiques à atteindre pour rester dans les limites « sécurisées » écologiques planétaires, mais d'une méthode visant à normaliser les différents impacts d'un système donné afin de les hiérarchiser entre eux en fonction de leur contribution à la dégradation des équilibres planétaires.

4.1.3 Influence de l'échéance de temps prise en compte

Un autre point à souligner est le choix de l'échéance prise en compte. Ici, les estimations effectuées par M. Meinshausen et ses collègues portaient sur une échéance de 50 ans. Nous avons fait le choix, pour estimer l'ordre de grandeur des émissions équivalentes, de ramener cette valeur au prorata temporis sur une année. Si cette simplification ne semble pas poser de difficultés majeures dans le cadre du CO₂, cette approche ne peut s'appliquer pour des gaz ayant une durée de vie plus courte, et une fonction de durée de vie dans l'atmosphère non linéaire.

Si nous avons voulu établir un seuil de GES en CO_{2eq}, il aurait fallu considérer les potentiels de réchauffement global (PRG) des différents GES. Par exemple, le méthane à une durée de vie beaucoup plus courte et un pouvoir radiatif bien supérieur à celui du CO₂. Sa prise en considération nécessite, pour établir un seuil, de choisir une échelle de temps, ce seuil changera considérablement selon l'échelle temporelle considérée.

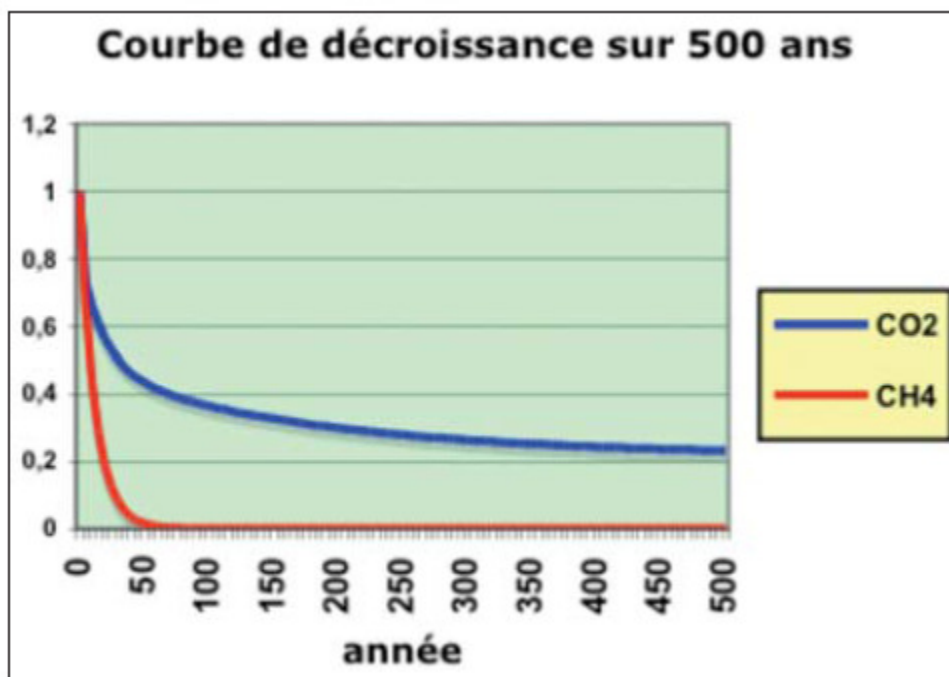


Figure 7. Courbe de décroissance du CO₂ et du CH₄ (Dessus et al., 2008)

4.1.4 Les émissions directes et indirectes.

Les émissions étudiées ici (issues en grande partie des bases de données EDGAR et CDIAC) **n'incluent que les émissions directes** des pays, c'est-à-dire les émissions réalisées directement sur le territoire considéré. Or les pays développés ont tendance à délocaliser leurs émissions de CO₂ dans les pays émergents via l'importation des produits fabriqués. Les émissions directes liées à la production des biens importés étant attribuée le pays producteur - exportateur) et non pas au pays importateur. Ainsi en 2005, en France, la différence entre les émissions territoriales et son empreinte carbone représenterait plus de 20 % des émissions de GES :

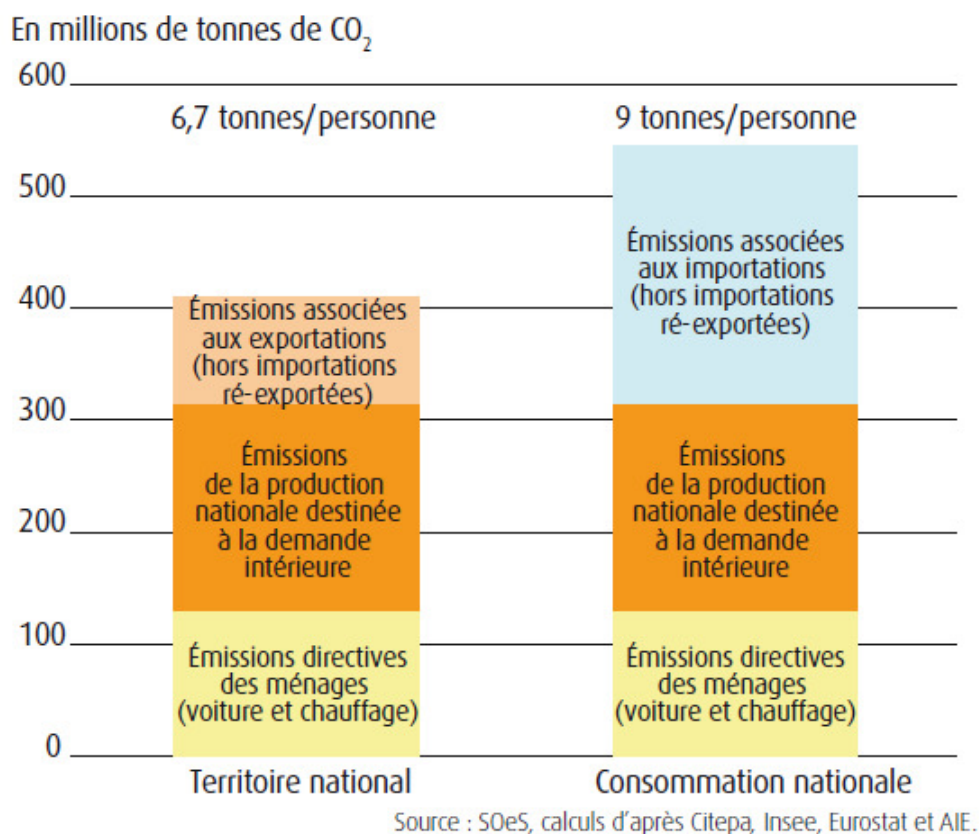


Figure 8. Émissions de CO₂ intérieures versus empreinte carbone de la demande française, année 2005 (Pasquier, 2010)

C'est pourquoi entre la baisse des émissions de GES de 7 % annoncée en France entre 2000 et 2010, l'empreinte carbone représente en réalité une hausse 15 %. Il est donc important de noter que les résultats présentés ici sont sans aucun doute sous-évalués et que les inégalités entre les pays développés et les pays en développement sont en réalité encore plus grandes. Toutefois ce point ne remet pas en cause les seuils en eux-mêmes, mais simplement leurs applications dans leur comparaison par rapport aux émissions d'une année donnée. Ce point a été en particulier développé dans le cadre des travaux sur l'analyse de cycle de vie territoriale effectués par Mines Alès dans le cadre de ce projet REPIS.

4.1.5 Des seuils lointains

Ces valeurs se basent sur des seuils fixes de CO₂ pour chaque année, or les mesures politiques, les évolutions scientifiques et technologiques, l'évolution de la consommation et de l'activité économique ainsi que de la population mondiale conduisent à des émissions actuelles qui évoluent et ne peuvent être considérées comme stables. Il est donc **réducteur de simplement diviser le budget de carbone par le nombre d'années de la période concernée**. De plus, même dans le cas « idéal » d'une tendance vers une réduction effective des émissions de CO₂ pour atteindre les budgets proposés, une période

d'adaptation sera nécessaire. Les émissions devront graduellement se réduire et ne pourront passer directement au niveau suggéré.

Ainsi, les scénarios proposés par différentes études, dont celle de l'UNEP déjà évoquée envisagent un pic d'émissions de CO₂eq (et *a fortiori* de CO₂) à une certaine période, suivie d'une baisse des émissions anthropiques de CO₂eq.

C'est l'hypothèse sur laquelle se base l'étude de l'UNEP. Ainsi, le scénario proposé par cette étude pour limiter la hausse des températures sous les 2 °C (>66 % de probabilité) prend la forme suivante (UNEP, 2013):

2015 – 2025 : 370 Gt CO₂e

2025 – 2050 : 506 Gt CO₂e

2050 – 2075 : 48 Gt CO₂e

2075 – 2100 : - 299 Gt CO₂e

Les seuils présentés précédemment apparaissent alors comme des **simplifications extrêmes** des phénomènes sociaux, économiques et environnementaux qui régissent les questions de seuil.

Notons toutefois que si dans cette étude les seuils proposés par l'UNEP de budget de CO₂ sur une période donnée ont été *partiellement* utilisés et appliqués à une autre méthode, c'est que l'objectif n'est en réalité pas le même. Lorsque ces derniers, tout comme les modélisations de l'IPCC, tentent d'établir un scénario à partir d'une situation et d'une période données - et nécessite dès lors de modéliser des fluctuations considérables d'émissions d'une année à l'autre - nous avons tenté d'établir un budget pour une société humaine ayant stabilisé ses émissions de CO₂.

Le raisonnement était d'envisager la possibilité méthodologique d'établir un budget maximum par an de CO₂ sur 50 ans pour l'humanité. Il ne s'agit pas d'une feuille de route pour les années à venir. Ce choix a pour vocation d'établir un budget politique qui correspond le mieux possible à un seuil écologique dans sa forme : sur le long terme et ayant tendance à tendre vers l'équilibre durable. Ces calculs ont pour vocation de penser une **période postérieure à une réduction considérable de nos émissions de GES** qui se traduit par les différentes modélisations proposées d'ici 2100.

4.1.6 Des conséquences ignorées

De nombreuses **incertitudes** sur les différents phénomènes naturels rendent impossible la connaissance du seuil écologique de carbone fixe. Ces incertitudes se répercutent dans l'élaboration d'un budget d'émission politique. Pour exemple, **les rétroactions** ne sont pas considérées dans les modélisations utilisées pour établir ces seuils. Ainsi, des phénomènes comme El Niño, la Nina, la fonte du permafrost, etc., s'ils venaient à être provoqués ou aggravés par l'homme (et nous savons que c'est déjà le cas) pourraient accroître la quantité de CO₂ dans l'atmosphère et, de fait, réduire considérablement la quantité de CO₂ anthropique que nous pourrions encore émettre dans l'atmosphère. Les seuils et les budgets d'émissions s'en verraient proportionnellement impactés en conséquence, mais rappelons qu'il s'agit là de budgets d'émissions politiques et non écologiques, dès

lors il est possible de faire *comme si* ces rétroactions n'existaient pas, à nos risques et périls. Or, nous savons par exemple que la fonte des glaces initiée est à présent inévitable (et donc une baisse de l'albédo, une fonte du permafrost...), mais cela reste aujourd'hui très complexe à modéliser. Cela doit donc, encore une fois, pousser à la plus grande précaution, car nous ignorons de nombreux facteurs et des nombreuses interconnexions qui pourraient nous faire surestimer (ou sous-estimer) la résilience du système global.

4.1.7 Des chiffres au pouvoir décisionnaire

L'une des autres limites, inévitable, mais non moins importante à souligner, est inhérente à tout transfert d'information complexe établie scientifiquement vers une applicabilité politique toujours simplifiée.

Dans le cas d'un budget carbone, par exemple, un danger possible pourrait être une mauvaise interprétation du concept de borne. Cette borne n'est pas une limite jusqu'à laquelle nous sommes libres d'aller, mais devrait être un maximum dont il s'agit de rester le plus éloigné possible. Or nous aurions peut-être tendance aujourd'hui à voir des interprétations des seuils comme des « permissions d'émettre » jusqu'à un certain point (d'ailleurs déjà largement dépassés). Nous pouvons d'ailleurs nous questionner ici sur la pertinence du choix du terme employé ici tel que celui « budget carbone » ou de « capital CO2 ».

4.1.8 Application d'échelle

Ces bornes donnent un ordre d'idée des émissions moyennes anthropiques « acceptables » au niveau individuel, toutefois ils ne peuvent, et ne doivent, être utilisées telles quelles. En effet les **responsabilités** liées aux émissions de CO2, actuelles comme historiques, sont très inégales et il s'agit de prendre cela en considération dans les choix politiques qui seront faits. Ainsi la responsabilité historique et actuelle de pays comme les États-Unis, la France, la Chine ou le Bangladesh ne sont pas les mêmes, de même que les conséquences liées à ces responsabilités (ou irresponsabilités) sont inégales. Il s'agit donc de penser une attribution de la responsabilité. Des questions éthiques doivent s'appliquer dans la répartition de ces « budgets écologiques ».

4.2 Rareté foncière et stockage des déchets : un seuil de soutenabilité pour le traitement des déchets en Ile de France ?

La disponibilité foncière au sein d'une surface terrestre finie est essentielle à maintes activités agricoles, industrielles et environnementales. L'usage de sols impacte par ailleurs de nombreux flux et stocks environnementaux. Une analyse et une compréhension des mécanismes fonciers peut donc contribuer à l'analyse de seuils écologiques et à la construction d'indicateurs pertinents spatialement

et temporellement. Nous prenons l'exemple de la disponibilité foncière pour les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND, au nombre de 250 en exploitation en France, avec des surfaces d'un seul tenant variant de quelques dizaines à quelques centaines d'ha, et assurant encore la fonction puits des matières résiduelles du métabolisme domestique et industriel dans la plupart des pays du monde) du fait de notre connaissance initiale du sujet et de la particularité de ses facteurs limitants : ils ne sont pas que physiques, ce qui donne un bon exemple de « panarchie » (interactions écosystèmes-sociétés). En effet, la difficulté d'implanter des « locally unwanted land use » (LULU) est connue depuis plusieurs décennies maintenant dans les pays développés anciennement (O'Hare, 1977 ; Méry et Mtibaa, 2011) et récemment (Asie et Amérique du Sud, notamment), et souvent traduite par le « syndrome NIMBY », expression connotée et datée qui ne rend pas compte du problème de justice distributive sous-jacent : comment distribuer spatialement la « charge » de l'accueil des déchets (face sombre de la société de consommation) quand les exigences techniques et économiques militent pour des effets d'échelle et donc de concentration spatiale des externalités négatives ? De ce fait, la disponibilité foncière réelle (intégrant toutes les externalités) est bien moindre que la disponibilité foncière physique que présente avec (une fausse ?) naïveté B. Lomborg dans son célèbre ouvrage « l'écologiste sceptique ».

Par ailleurs, le principe de zones tampon réglementaires (périmètre sans habitation permanente d'au moins 200m autour des installations dans la réglementation actuelle des ISDND) permet de tester la possible existence de seuils d'urbanisation au-delà desquels il n'est plus possible de trouver les espaces requis. Si notre exemple concerne les ISDND, il pourrait tout aussi bien s'appliquer à la préservation de zones naturelles (contribuant au maintien de la biodiversité) ou à l'implantation d'éoliennes (contribuant à la transition énergétique).

Des simulations géomatiques sur un espace réel (département de l'Ile de France) ont ainsi montré que si la distance périmétrique tampon dépasse les 500m, il devient quasiment impossible d'implanter une ISDND compte tenu de la diffusion spatiale du bâti pré-existant (David, 2015). Ce résultat crédibilise des simulations faites par des acteurs de l'énergie éolienne (certes intéressés) montrant qu'une interdiction d'éoliennes à moins de 1000m des habitations bloquerait en France l'évolution de la filière (et donc la transition énergétique, en lien avec le seuil écologique de la concentration de CO₂ de Rockstrom). Il met aussi en évidence l'importance de la répartition spatiale du bâti pour implanter des « LULU » (et plus généralement tout grand espace d'un seul tenant, comme cela pourrait être requis dans les politiques territorialisées de la TVB) : en Lozère, le seuil de localisation/constructibilité des ISDND ne sera pas le même qu'en Ile de France, tout comme il sera différent en Bretagne, région connue pour la difficulté d'implantation de LULU (avec la question de savoir si la cause est plus spécifiquement physique ou, si on admet l'hypothèse culturaliste, sociale). Entre pays même contigus (Italie, Bénélux, Allemagne par exemple), il est probable qu'une telle analyse comparative donne des résultats intéressants, voire insoupçonnés.

La disponibilité foncière dépendant aussi de facteurs humains concernant les LULU, nous avons à notre disposition un exemple d'interaction entre une donnée environnementale (l'espace physique) et une donnée humaine que l'on a cherché à représenter (la capacité de mobilisation contre les LULU). Si l'analyse statistique des données franciliennes dans (David, 2015) montre surtout la classique opposition rural/urbain pour l'Ile de France, une prise en compte plus approfondie de facteurs sociopolitiques (telle que l'a initiée Putnam en Italie et prolongé Callois (2005) par exemple) expliquant la capacité de mobilisation permettrait certainement apporter des éclairages intéressants, y compris en termes de justice environnementale : pourquoi y a-t-il moins d'installations (en fait, aucune) dans le quart sud-ouest de l'Ile de France (axe Versailles-Rambouillet) que partout ailleurs dans cette région ?

4.3 Caractérisation des flux de matière et d'énergie - Utilisation de la méthodologie d'ACV territoriale

La question de la possible dualité d'effets (locaux versus globaux), et des signaux ne peut s'aborder sans la mise au point d'un système d'évaluation des pressions environnementales clairement territorialisé. L'Analyse de Cycle de Vie est à ce jour le cadre le plus performant que nous ayons à disposition pour une évaluation multicritère d'un bien ou d'un service. Cependant, ce cadre ne permet pas une distinction entre prélèvement interne et prélèvement à l'extérieur d'un territoire, ni entre effet occasionnés à l'intérieur et effets globaux. Or, tous les territoires et les écosystèmes qu'ils supportent, n'ont pas la même sensibilité aux pressions environnementales. S'en déduit donc le besoin de territorialiser ces analyses (Loiseau, 2014).

L'utilisation de l'ACV territoriale pour quantifier les flux d'un territoire, permet à la fois d'estimer les flux direct entrants et sortant du territoire, mais aussi les flux indirects générés par les activités du territoire mais se déroulant sur d'autres territoires, afin de considérer la notion de responsabilité totale proposée par Eder et Narodslawsky (1999). La responsabilité totale considère que le territoire est non seulement responsable des émissions directement générées par les activités présentes sur le territoire, mais aussi de celles induites sur d'autres territoires par ses propres activités de consommation et de production. La seule exception concerne les activités situées en aval de ses activités de production. Pour ce faire, le modèle de différenciation d'un système de premier plan (c'est-à-dire des activités présentes sur le territoire) d'un système d'arrière-plan (toutes les autres activités support aux activités présentes sur le territoire et étant localisées hors du territoire) de (Azapagic et al., 2007) a été utilisée. A partir de ces flux, il est possible d'estimer, en utilisant les bases de données de l'ACV, les impacts potentiels. Cela conduit ensuite à considérer les impacts « in-site » produits sur le territoire des impacts « off site », produits sur d'autres territoires (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.9**).

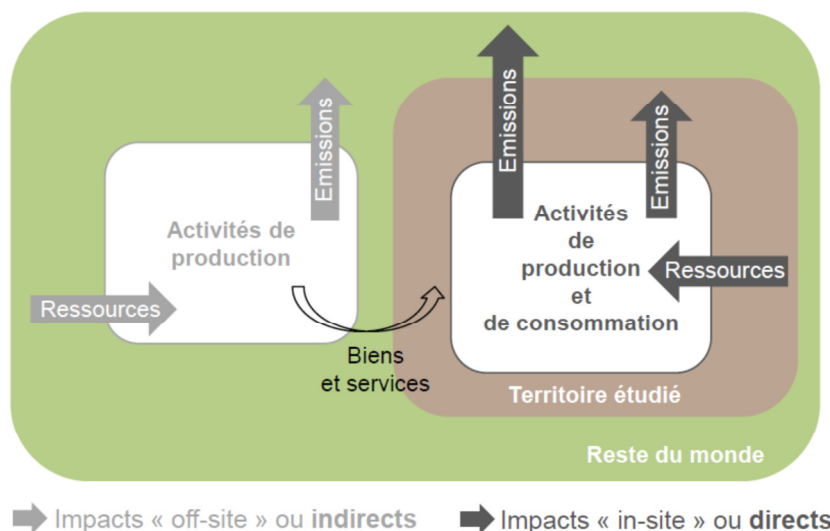


Figure 9. Impacts in site et off-site (Loiseau, 2014)

Cette différenciation permet de mettre en évidence d'éventuels transferts d'impacts d'un territoire à un autre. Elle pourrait permettre aussi la prise en compte de spécificités locales afin de régionaliser les impacts « in-site ». Une telle analyse doit s'appuyer sur un territoire bien défini, en l'occurrence celui de la future métropole d'Aix-Marseille-Provence. Nous avons testé cette approche dans le cadre de cette étude pour un flux d'importance capitale, celui du phosphore.

Des travaux antérieurs ont montré que les impacts engendrés par les flux générés sur d'autres territoires pouvaient être majoritaires (Loiseau et al., 2014). Ceci est confirmé au niveau des flux de phosphore qui mettent en évidence la nécessité de prendre en compte les activités d'arrière-plan : les émissions in site représentent 18% des émissions totales et les consommations locales 7% (tableaux 1 et 2).

Tableau 6. Flux de phosphore totaux (insite et off site)

Tonne eqP (eqP/hab/an)	Consomma tion (Raw materials)	Emissions Air (Phosphor us)	Emissions Sols (Phosphor us)	Emissions totales eau (Phosphat es)	Emissions eau - océan (Phosphat es)	Emissions totales eau (Phosphor us)	Emissions eau - océan (phosphor us)	Emissio ns totales
Activités de consommation	133 (0,0723)	2,3 (0,0012)	2,3 (0,0013)	586 (0,3189)	0,1277 (6,95101E-05)	2 162 (1,1768)	0,0946 (5,14904E-05)	2 752 (1,4982)
Activités de production	3 725 (2,0280)	3,6 (0,0020)	28 (0,0151)	21 038 (11,4534)	4,1 (0,0022)	171 (0,0929)	6,9 (0,0038)	21 239 (11,5633)
Activités de production - Agriculture, pêche et foresterie	0,1988	0,0001	0,0002	0,0728		0,0041		0,0771
Activités de production - Industries et énergie	1,8292	0,0018	0,0149	11,3818		0,0888		11,4873

Les flux liés aux activités industrielles et énergies sont largement majoritaires (89%), que ce soit en consommation de ressources ou en émissions.

Tableau 7. Flux de phosphore directs (in site)

TonneseqP (kgeqP/hab/a n)	Consommatio n (Raw materials)	Emissions Air (Phosphoru s)	Emissions Sols (Phosphoru s)	Emissions totales eau (Phosphate s)	Emissions totales eau (Phosphoru s)	Emission s totales
Activités de consommation	0	0,7 (0,0004)	0,002 (10 ⁻⁶)	106,9 (0,0582)	388 (0,2114)	496 (0,27)
Activités de production	277,9 (0,1513)	0,5 (0,0003)	~0	106 (0,0577)	129 (0,07)	235 (0,128)

D’après les données des bilans, il semble y avoir une grande sous-estimation des flux consommés via la fonction alimentaire et du phosphore contenu dans les boues de STEP. De plus, la balance entre entrées et sortie est aussi déséquilibrée : certaines données d’inventaires concernant les flux de phosphore semblent être incomplètes.

Malgré ces limitations, ces résultats montrent que pour estimer la contribution d’un territoire à un processus d’irréversibilité global, il est nécessaire de discriminer les flux directs et indirects. Le total de ces flux peut être comparé aux limites planétaires de Rockstrom et aux stocks mondiaux de phosphore par une normalisation par rapport au nombre d’habitants en 2010. Toutefois, des problèmes de double comptage pourraient survenir avec cette approche.

Les flux in site pourraient quant à eux être comparés à des indicateurs locaux d’autosuffisance du territoire ou de qualité des eaux et des rejets, ayant des conséquences locales ou tout au moins localisées (si certains flux sont exportés). Il doit ainsi être possible, en élargissant cette analyse à un plus grand nombre de flux élémentaires, de déterminer, pour un écosystème donné, les bornes qui lui sont propres.

Si l’évaluation des bornes planétaires se heurte à la diversité des écosystèmes, chacun avec des limites qui lui sont propres, la détermination de ces « thresholds » pour un ou un nombre bien limité d’écosystèmes rentre dans le domaine du réalisable, permettant de proposer des bornes spécifiques. Il sera donc possible de déterminer quelle est la responsabilité d’un territoire (ou de plusieurs territoires) dans le dépassement d’une certaine borne. Egalement, mais en procédant de façon inversée, il sera possible d’établir quelles sont les contributions maximales admissibles de chaque contributeur pour un écosystème donné.

Cette approche ne permet pas de prendre en compte les cascades et/ou interactions entre les écosystèmes, mais constitue un premier pas pour une aide à la décision à partir de données vérifiables.

5 Exploitation des résultats

Ce projet s'est finalisé par la réalisation d'un séminaire de travail, le 20 novembre à Montpellier (IRSTEA Montpellier) ayant pour objectif d'échanger sur les résultats du projet entre les équipes impliquées dans le projet ainsi qu'avec l'équipe de Philippe Roux, d'IRSTEA qui avait fait part de son intérêt pour une collaboration ultérieure sur ce thème. L'objectif de ce séminaire était de permettre un premier échange scientifique sur le thème des seuils écologiques dans le cadre des indicateurs de pression (utilisés dans les ACV par exemple), dans l'optique d'initier les bases de réflexion pour élaborer une réponse à un appel d'offre plus ambitieux de recherche (de type ANR par exemple). Il est apparu au cours des échanges de ce séminaire que la question de l'estimation des flux environnementaux liés aux consommations pose un réel problème méthodologique aujourd'hui : ni l'approche par entrées – sorties ni l'approche par ACV ne sont aujourd'hui satisfaisantes.

Les bilans matières des tableaux-entrées sorties présentent l'avantage d'être équilibrés contrairement à l'ACV qui ne permet pas de présenter des bilans matières équilibrés (car cela n'a pas été conçu à cette fin). Par contre, les données des tableaux-entrées sorties sont souvent difficiles à obtenir d'une part au niveau local, d'autre part pour les autres régions du Monde afin d'estimer les flux liés aux importations.

Il apparaît nécessaire d'améliorer la méthodologie de la partie inventaire afin de trouver un compromis entre fiabilité des données tout en évitant les doubles comptages.

Les discussions avec P. Roux nous ont permis d'ouvrir plusieurs perspectives de recherche en termes d'applications locales travaux sur les bornes planétaires et capacité de charge:

- permettre la **hiérarchisation de la gravité des impacts**. La Technical University of Denmark est en train de travailler là-dessus (Bjorn, 2015). Cela répond à une forte demande de la part des utilisateurs d'ACV. L'utilisation des seuils proposés par (Rockström, 2009) pour hiérarchiser les différents impacts entre eux permet de proposer une alternative aux décideurs face à la monétarisation, l'approche single score de type « Bilan carbone » ou autres méthodes jusqu'à aujourd'hui relativement insatisfaisantes de hiérarchisation des impacts.
- **Estimer les impacts liés à la consommation de ménages** (empreinte d'un citoyen moyen) en lien avec les seuils de Rockström (sorte d'empreinte d'écologique élargie aux différentes limites planétaires).
- **aider les aménageurs à répondre à des questions qu'ils se posent** relativement aux seuils locaux (ex. : travaux de l'IRSTEA sur les implantations des ISDND).

D'autres chercheurs, ayant été impliqués dans l'encadrement des stages de master effectués dans le cadre du projet REPIS se sont montrés intéressés ce thème et pourraient être impliqués dans un projet ultérieur : Romain Garcier (géographe, ENS Lyon), Aurélien Boutaud (environnementaliste, consultant indépendant), Fabrice Bardet (sociologue de l'évaluation, Laboratoires RIVES de l'UMR 5600 EVS), Eléonore Loiseau.

Le projet a donné lieu à la rédaction de deux mémoires de master recherche :

David, S., 2015. Rareté foncière et stockage des déchets : un seuil de soutenabilité pour le traitement des déchets en Ile de France ? (Mémoire de master recherche 2 « Systèmes Territoriaux, Aide à la Décision et Environnement »). ENS Lyon, Lyon.

Leclerc, B., 2015. Réflexion pour l'établissement d'un seuil de Carbone. Evaluation de soutenabilité environnementale (Rapport de Master 2 Ethique et développement durable). Faculté de Philosophie, Université Jean Moulin Lyon 3, Lyon.

D'autre part, il se trouve que deux des membres du projet REPIS ont soutenu leur habilitation à diriger les recherches pendant le projet REPIS. Les problématiques et discussions abordées dans le cadre du projet ont donc pu être développées dans le cadre du mémoire, et de la soutenance des habilitations à diriger de recherches de Guillaume Junqua et Natacha Gondran :

- JUNQUA G., Du développement d'outils de mesure à la mise en œuvre d'un cadre conceptuel d'analyse et d'évaluation des performances en écologie industrielle et territoriale. Habilitation à diriger les recherches soutenue le 21 avril 2015. Ecole doctorale GAIA de l'Université Montpellier, 2015
- GONDRAN N., Evaluation et représentation des enjeux environnementaux dans une perspective de transitions écologique et énergétique. Habilitation à diriger les recherches soutenue le 24 avril 2015. Ecole doctorale Sciences, Ingénierie Santé. Université Jean Monnet de Saint-Etienne; Ecole des Mines de Saint-Etienne, 2015

Plusieurs communications effectuées pendant les deux ans du projet ont également amené les participants au projet à présenter les réflexions du projet REPIS et échanger sur les réflexions menées dans le cadre du projet REPIS avec d'autres acteurs.

- Communication au colloque de Cerisy : GONDRAN N., Enjeux et problématiques de l'évaluation et de la représentation des impacts environnementaux?. *Colloque de Cerisy : Quelles transitions écologiques ?*, Jun 2015, Cerisy France. 2015.

Le thème de la détermination de seuils écologiques a été l'objet de nombreux échanges au cours du colloque de Cerisy sur les transitions écologiques. En effet, certains auteurs proposent de soumettre les conditions d'échanges économiques à des limites écologiques. Par exemple, l'économiste Christian Arnsperger, propose d'établir une monnaie basée sur les limites écologiques. La sociologue Mathilde Szuba propose quant à elle l'établissement de quotas individuels de rationnement carbone, à l'instar d'une initiative britannique portée par le collectif The Ministry of Trying to Do Something About It¹¹.

- **GONDRAN N., BOUTAUD A.,** Bienvenue dans l'anthropocène ? *La future métropole vue par 50 contributeurs*. Grand Lyon prospective. Mars 2014, pp. 160-164

Parallèlement au projet REPIS, des échanges ont eu lieu avec le Grand Lyon sur les implications de l'atteinte des seuils d'irréversibilité pour les différentes crises écologiques présentées par (Rockström, 2009). Ces échanges ont eu lieu dans le cadre d'une mission de veille pour le Grand Lyon, pour laquelle ARMINES/Saint-Etienne est mandatée, en partenariat avec Aurélien Boutaud. Ces discussions ont eu lieu plus particulièrement avec les services de la Direction de la Prospective et du débat Public du Grand Lyon, les services en charge du développement durable et le vice-président en charge du développement durable du Grand Lyon. La réflexion qui nous a été demandée par le Grand Lyon était d'identifier quelles étaient les implications pour le Grand Lyon, des menaces écologiques liées à l'atteinte des seuils d'irréversibilité présenté par (Rockstrom, 2009). La vulnérabilité peut être définie comme le « *Sensibilité plus ou moins forte d'un enjeu à un aléa donné* » (Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques -SEI Direction Générale de l'Urbanisme, 2007) où la notion d'enjeu peut à son tour être défini ici comme « *les personnes, biens, activités, éléments du patrimoine culturel ou environnemental, menacés par un aléa ou susceptibles d'être affectés ou endommagés par celui-ci. Ils sont liés à l'occupation du territoire et à son fonctionnement* » (Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques -SEI Direction Générale de l'Urbanisme, 2007). Cela nous a ainsi conduit à croiser les grands thèmes présentés par (Rokstrom, 2009), pouvant être définis comme des « aléas » susceptibles de générer des crises à l'échelle local avec les grands enjeux du territoire tels que l'alimentation, la santé, le logement, la mobilité, la biodiversité, l'économie. Nous avons cherché à identifier les enjeux portant sur l'intersection entre ces composantes. Par exemple, quels sont les travaux concernant les implications des limites écologiques pesant sur le cycle du phosphore avec la capacité des territoires à nourrir leurs habitants ? Nous nous sommes rapidement aperçus que l'ampleur de la tâche dépassait largement les quelques journées de travail financées par le Grand Lyon pour aborder cette question et nous avons ainsi identifié que le lien entre les crises écologiques évoquées par (Rockström, 2009) et la vulnérabilité des territoires ainsi que leurs capacités de résilience était un sujet susceptible d'intéresser de nombreux acteurs locaux. Ce sujet a été évoqué avec Francis Jutand, de l'Institut Mines Télécom, comme un des sujets potentiels pour le programme « Futuring

¹¹ <https://theministryoftryingtodosomethingaboutit.wordpress.com/>

cities ». Nous nous sommes dans ce cadre rapproché de collègues spécialisés en analyse des risques (Eric Piatyszek, Mines Saint-Etienne) pour définir les sujets de réflexion qui suit. Dans un contexte de changement climatique, de pressions anthropiques croissantes sur les ressources fossiles, biologiques et minérales, les villes sont devenues de par leurs degrés de vulnérabilité et d'exposition, des points névralgiques. Cela soulève la question de leurs vulnérabilités, leurs capacités de résilience (lors de la gestion de perturbations d'origine aussi bien exogène qu'endogène à la ville elle-même) mais aussi de leur durabilité dans le long terme. Ce projet prospectif vise à voir comment mobiliser des outils issus à la fois des sciences des risques que de l'évaluation environnementale afin :

- de développer des outils d'aide à la réflexion permettant d'aider les acteurs territoriaux à évaluer la vulnérabilité de leur territoire face aux différentes crises pouvant survenir,
- d'identifier des indicateurs permettant de représenter en quoi la ville et ses habitants contribuent eux-mêmes à l'émergence de ces crises. Pour certains thèmes environnementaux, la ville subit elle-même les conséquences des pressions environnementales qu'elle génère (pollution locale, par exemple). Pour d'autres, souvent plus difficiles à aborder par les acteurs, pressions et impacts sont dissociés dans le temps et l'espace (changement climatique, par exemple).
- d'identifier des indicateurs du système « Ville » qui permettent à la fois de rendre compte de la capacité d'adaptation de la ville aux nombreuses perturbations qu'elle génère ou qu'elle subit (analyse court terme), mais aussi de caractériser le niveau de soutenabilité des villes et leurs résiliences sur le long terme, c'est-à-dire sa capacité à retrouver un état stable d'équilibre après la crise.

Notons que nous avons été récemment contactés par des acteurs territoriaux sur ces questions (Grand Lyon, Région Nord Pas de Calais), sans être en mesure de leur fournir des réponses ou outils opérationnels sur le court terme.

Pour l'instant, cet axe de recherche ne fait pas l'objet de projets concrets, si ce n'est le dépôt d'une fiche prospective dans le cadre de la réflexion « Futuring cities » menées par l'IMT, mais il s'agit d'une piste de recherche que nous avons en tête pour l'avenir.

GONDRAN N., Le projet REPIS « Réflexion Et Propositions d'Indicateurs susceptibles de faire l'objet de Seuil de durabilité », Séminaire AO INDECO « Indicateurs environnementaux », 23 octobre 2013, Paris, communication orale

6 Discussion

Ainsi, nous avons vu qu'il était possible de déterminer des « **budgets écologiques** » (« planet boundary allowance »), mais la définition des bornes, et a fortiori sa répartition par personne et dans le temps, implique outre l'incertitude évoquée plus haut pour l'exemple du carbone, d'autres critères

que les critères scientifiques et écologiques : critères économiques (l'exemple du foncier analysé par S. David le montre bien), considérations politiques (les difficultés des négociations internationales autour de la question du changement climatique en sont une illustration), mais également philosophiques.

Sur ce dernier domaine, B. Leclerc a montré que les cadres posés par trois théories de la justice différentes peuvent orienter des cadres de réflexion complètement différents en termes de détermination de seuils ou de « budgets écologiques » (Leclerc, 2015) :

- L'ambition de la théorie de la justice utilitariste (Bentham, Mill, XIX^{ème} siècle) était d'élaborer une philosophie politique basée sur le raisonnement selon lequel une société juste serait une société qui permettrait le maximum de plaisirs (agrégés) et le minimum de peines (agrégées), selon le principe que « *Chacun compte pour un et personne pour plus d'un* » (Mill, 1861). Si l'on considère les individus des générations futures au même titre que les individus actuels et si l'on exclue l'hypothèse d'une « technologie salvatrice », cette théorie pourrait impliquer un seuil radical de zéro émission de CO₂ couplé à une aide envers les pays les plus pauvres économiquement. En effet, si toutes les générations (présentes et futures) devaient être considérées (sur des siècles ou des millénaires), les bonheurs (agrégés) des générations actuelles résultant de ces émissions de CO₂ ne sauraient être comparables aux malheurs (agrégés) qui en résulteraient pour le plus grand nombre dans le cas d'une modification irréversible du climat et des conditions de vie sur Terre. Par ailleurs, une société juste devrait permettre aux personnes en situation de pauvreté d'améliorer leurs conditions de vie pour éviter d'accentuer les disparités à l'avenir et donc de réduire le bonheur global.
- Selon la théorie de la justice libérale égalitaire (Dworkin, Rawls, XX^{ème} siècle), « *Chaque personne a un droit égal au système total le plus étendu de libertés de base égales pour tous, compatible avec un même système pour tous* » (Rawls, 1971). Cette théorie se base essentiellement sur un état de base juste qui laisse ensuite libres les individus de s'épanouir selon leurs souhaits. S'il faut prendre en considération les générations à venir (puisque ce pourrait être elles les plus défavorisées à protéger), il s'agirait surtout d'assurer un état-cadre initial juste. Cette théorie impliquerait probablement un seuil intermédiaire portant sur l'élévation de température (2 °C ou 1 °C). Ce seuil devrait être couplé à une redistribution des droits au développement et à l'émission pour permettre aux pays les plus pauvres d'atteindre un niveau minimal d'émission afin de pouvoir répondre aux besoins de leurs populations.

Notons toutefois que la pluralité des systèmes politiques souverains actuels semble peu propice à la mise en place de telles ambitions. Comment serait-il possible d'imposer un tel seuil à une échelle mondiale sans porter atteinte à la souveraineté des pays ? À l'échelle d'un pays le problème est le même : comment imposer de telles mesures aux populations ?

- La théorie de la justice libertarienne (Nozick, XX^{ème} siècle) se base sur l'idée que le juste ne se base pas sur le bonheur, mais sur la liberté. Dès lors, les États ne doivent pas porter atteinte à

ce droit fondamental et ne peuvent imposer ni limite ni contrainte si ce n'est celle de ne pas porter atteinte à celle des autres. L'idée d'un « budget carbone » imposé semble donc incompatible avec la conception libertarienne de la justice dans la mesure où cela serait une atteinte à la liberté des individus.

Cependant, nous ne devons pas oublier que les libertés individuelles sont également une question collective (pour les choix de sociétés, d'équité entre les individus et de modalités de gestion des biens communs, par exemple). Pour permettre aux différents individus de faire des choix, individuels et collectifs, libres et informés, il nous semble nécessaire de développer les connaissances ainsi que la diffusion de ces connaissances sur les limites planétaires, les seuils écologiques d'irréversibilité et les risques en cas d'atteinte de ces seuils.

Ces propositions, pour pouvoir être portées politiquement, implique une réflexion a priori sur comment et par qui fixer les « seuils écologiques » à intégrer dans les processus décisionnels. Cette problématique très opérationnelle ressort aussi des théories de la démocratie en sciences politiques :

Bourg et Whiteside (2010) montrent la difficulté de la démocratie représentative à intégrer le long terme dans les décisions collectives et proposent quelques idées cherchant à éviter dictatures du présent comme dictatures (y compris « vertes ») du futur (pour reprendre les termes utilisés par Chichilnisky (1996)). En fait, dans une démocratie, on ne voit pas comment une transition ne pourrait s'opérer qu'à partir des élites : le projet d'éco-taxation routière française du début des années 2010, certainement bien pensé par certains « technocrates verts », s'est heurté dans son application à des oppositions populaires spectaculaires (et amplifiées médiatiquement), mais finalement très localisées et pas forcément représentatives. Une difficulté des démocraties post-modernes où la pré-éminence épistémologique plus ou moins pertinente de la science (assimilable à une religion moderne dans ses versions les plus scientistes) ne peut plus garantir d'elle-même l'application et l'acceptation automatique de décisions « rationnelles », est de gérer des intérêts et valeurs divergents émanant parfois de communautés faibles en nombre mais influentes en termes financiers (lobbying) ou activistes, l'intensité des préférences étant mal prise en compte par les procédures simplifiées de vote à la majorité. Les méthodes de démocratie participative (comme les Débats Publics en France et au Canada, les consultations dans l'élaboration des lois aux Etats-Unis) et surtout délibérative (comme les conférences de citoyens initiées en Europe du Nord et les budgets participatifs en Amérique du Sud) cherchent à limiter les biais de la démocratie représentative (Rosanvallon, 2006) et constituent un espoir en ce sens. Mais la participation, si elle facilite indiscutablement l'application des décisions dans une optique d'efficacité managériale de la démocratie, ne garantit pas nécessairement une meilleure prise en compte de l'environnement (Labranche, 2009). Une évolution des systèmes de valeurs reste nécessaire, et celle-ci dépend de tendances dans la longue durée, d'événements externes et internes, de l'intensité de divers activismes (mouvements sociaux et environnementaux de la société civile, lobbying des acteurs économiques)...

7 Références bibliographiques

- Allen, M.R., Frame, D.J., Huntingford, C., Jones, C.D., Lowe, J.A., Meinshausen, M., Meinshausen, N., 2009. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature* 458, 1163–1166. doi:10.1038/nature08019
- Alvarez I., Martin S., 2010, Indicateurs dynamiques de gestion durable, 23e Entretiens du Centre Jacques Cartier - Vulnérabilité et résilience des écosystèmes : l'utopie d'une gestion durable - Lyon, les 22 et 23 novembre 2010, pp. 6-15
- Azapagic, A., Pettit, C., Sinclair, P., 2007. A life cycle methodology for mapping the flows of pollutants in the urban environment. *Cleaner Technologies and Environmental Policy* 9, 199–214.
- Bardi U., 2015, *Le Grand Pillage – Comment nous épuisons les ressources de la planète*, Ed. Les petits matins, ISBN 9782363831651
- Barnosky, A., Hadly, E., Bascompte, J., Berlow, E., Brown, J., Fortelius, M., Getz, W., Harte, J., Hastings, A., Marquet, P., Martinez, N., Mooers, A., Roopnarine, P., Vermeij, G., Williams, J., Gillespie, R., Kitzes, J., Marshall, C., Matzke, N., Mindell, D., Revilla, E., Smith, A., 2012. Approaching a State Shift in Earth's Biosphere. *Nature* 486, 52–58.
- Bjørn, A., Hauschild, M.Z., 2015. Introducing carrying capacity-based normalisation in LCA: framework and development of references at midpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20, 1005–1018. doi:10.1007/s11367-015-0899-2
- Bourg D. Whiteside K.. 2010, *Vers une démocratie écologique - Le citoyen, le savant et le politique*, Seuil
- Bronner G., Géhin E., 2010, *L'Inquiétant Principe de précaution*, Paris, PUF (« Quadrige »)
- Callois J.M., 2005, *Approches microéconomiques du développement local : prise en compte de la notion de capital social dans l'analyse des espaces périphériques*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Bourgogne
- Chichilnisky, G., 1996, An axiomatic approach to sustainable development, *Social Choice and Welfare* , 13(2), 219–248.
- Dakos V. Carpenter S., van Nes E., 2014, Resilience indicators: prospects and limitations for early warnings of regime shifts, *Philosophical transactions B*, 37020130263
- David, S., 2015. Rareté foncière et stockage des déchets : un seuil de soutenabilité pour le traitement des déchets en Ile de France ? (Mémoire de master recherche 2 « Systèmes Territoriaux, Aide à la Décision et Environnement »). ENS Lyon, Lyon.
- Dessus, B., Laponche, B., Le Treut, H., 2008. Effet de serre : n'oublions pas le méthane ! *La Recherche* n° 417.
- Diamond J., 2006, *Effondrement. Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*, Gallimard, NRF essais, 2006 (ISBN 2-07-077672-7)
- Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques -SEI Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la C., 2007. *Le plan de prévention des risques technologiques (PPRT) - Guide méthodologique*, Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables. ed. Paris.
- Doka, G., 2015. Combining life cycle inventory results with planetary boundaries: The Planetary Boundary Allowance impact assessment method PBA'05.
- Dupuy J.P., 2004, *Pour un catastrophisme éclairé. Quand l'impossible est certain*, Seuil, ISBN 978-2-02-066046-4.
- Eder, P., Narodoslawsky, M., 1999, What environmental pressures are a region's industries responsible for? A method of analysis with descriptive indices and input-output models, *Ecological Economics* 29, 359–374.
- Etablissement vert Bruntland de la Centrale des Syndicats du Québec, 2013. *Les biomes forestiers*.
- Gerten, D., Rockstrom, J., Heinke, J., Steffen, W., Richardson, K., Cornell, S., 2015. Response to Comment on "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet." *Science* 348, 1217–1217. doi:10.1126/science.aab0031
- Groffman, P.M., Baron, J.S., Blett, T., Gold, A.J., Goodman, I., Gunderson, L.H., Levinson, B.M., Palmer, M.A., Paerl, H.W., Peterson, G.D., Poff, N.L., Rejeski, D.W., Reynolds, J.F., Turner,

- M.G., Weathers, K.C., Wiens, J., 2006. Ecological Thresholds: The Key to Successful Environmental Management or an Important Concept with No Practical Application? *Ecosystems* 9, 1-13. doi:10.1007/s10021-003-0142-z
- Guéant O., Guesnerie R., Lasry J.M., 2012, Ecological intuition versus economic "reason", *Journal of public economic theory*, 14(2), 245-272
- Guesnerie R., Henriot F., Nicolai J.P., 2012, Trois questions épineuses à l'arrière-plan des politiques climatiques, *Annales d'économie et de statistique hors série n°1*, Economie, environnement et destin des générations futures
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., Pagani, M., Raymo, M., Royer, D.L., Zachos, J.C., 2008. Target Atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim? *The Open Atmospheric Science Journal* 2, 217-231. doi:10.2174/1874282300802010217
- Hastings A., Wysham D.B., 2010, Regime shifts in ecological systems can occur with no warning, *Ecology Letters*, 13, 464-472
- Hoekstra, A.Y., Wiedmann, T.O., 2014. Humanity's unsustainable environmental footprint. *Science* 344, 1114-1117. doi:10.1126/science.1248365
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of IPCC*, Cambridge University Press. ed. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jaramillo, F., Destouni, G., 2015. Comment on "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet." *Science* 348, 1217-1217. doi:10.1126/science.aaa9629
- Jaramillo, F., Destouni, G., 2015. Freshwater consumption has already crossed the global freshwater planetary boundary. *Science* 1217.
- Jonas, H., 1979. *Le principe responsabilité*, Champs Essais. ed.
- Labranche S., 2009, L'insoutenable légèreté environnementale de la participation : une problématisation », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 9 Numéro 1 | mai 2009, mis en ligne le 25 mai 2009, URL : <http://vertigo.revues.org/8346> ; DOI : 10.4000/vertigo.8346
- Leclerc, B., 2015. *Réflexion pour l'établissement d'un seuil de Carbone. Evaluation de soutenabilité environnementale (Rapport de Master 2)*. Faculté de Philosophie, Université Jean Moulin Lyon 3, Lyon.
- Le Quéré, C., 2010. Trends in the land and ocean carbon uptake. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2, 219-224. doi:10.1016/j.cosust.2010.06.003
- Loiseau, E., 2014. *Elaboration d'une démarche d'évaluation environnementale d'un territoire basée sur le cadre méthodologique de l'Analyse du Cycle de vie (ACV). Application au territoire du bassin de Thau (thèse de doctorat)*. Ecole doctorale Sciences des Procédés - Sciences des Aliments Université de Montpellier, UMR ITAP.
- Loiseau, E., Roux, P., Junqua, G., Maurel, P., Bellon-Maurel, V., 2014. Implementation of an adapted LCA framework to environmental assessment of a territory: important learning points from a French Mediterranean case study. *Journal of Cleaner Production* 80, 17-29. doi:10.1016/j.jclepro.2014.05.059
- Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S.C.B., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D.J., Allen, M.R., 2009. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. *Nature* 458, 1158-1162. doi:10.1038/nature08017
- Méry J., 2010, L'éthique environnementale dans les outils d'évaluation économique et environnementale : application à l'équité intergénérationnelle et à la gestion des déchets, *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 10 Numéro 1 | avril 2010, mis en ligne le 10 mai 2010, URL : <http://vertigo.revues.org/9620>
- Méry J., Matias M., Deleuil J.M., Olivier F., 2011, Physical and human geography of the French landfill neighbourhoods, *Sardinia 2011, Cagliari*, 3-7 october 2011, Cagliari, Italy
- O'Hare M., 1977, *Not on My Block You Don't - Facilities Siting and the Importance of Compensation, Public Policy*, Volume 25, pp. 405-458.
- Pasquier, J.L., 2010. *CO₂ et activités économiques de la France - Tendances 1990-2007 et facteurs d'évolution (No. 978-2-11-098771-6)*, Etudes et documents. CGDD (Conseil Général au Développement Durable), Orléans.

- Rawls, J., 1971. *Théorie de la justice*, Points. ed, Essais.
- Rethoré, O., 2010. L'Analyse de Cycle de Vie (ACV), outil préférentiel de quantification des impacts environnementaux, in: *L'Encyclopédie Du Développement Durable*.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., Wit, C.A. de, Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475. doi:10.1038/461472a
- Rosanvallon P., 2006, *La contre-démocratie. La politique à l'âge de la défiance*, Seuil, 2006 ; Points-Essais, no 598, 2008. ISBN 978-2-02-088443-3"
- Running, S., 2012. A Measurable Planetary Boundary for the Biosphere. *Science* 337, 1458–1459. doi:10.1126/science.1227620
- Scheffer M., Carpenter S., Foley J., Folke C., Walker B. , 2001, Catastrophic shifts in ecosystems, *Nature*, 413, 591-596.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sorlin, S., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855–1259855. doi:10.1126/science.1259855
- Tainter J., 2013, *L'Effondrement des sociétés complexes*, Le Retour aux Sources, 2013 (ISBN 978-2355120510).
- UNEP, 2013. *The Emissions Gap Report 2013*, United Nations Environment Programme (UNEP). ed. Nairobi, Kenya.